

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ СЛОЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ¹

А. М. Гришин, А. А. Долгов, В. П. Зима, Д. А. Крючков, В. В. Рейно*,
А. Н. Субботин, Р. Ш. Цвык*

Томский государственный университет, 634050 Томск

* Институт оптики атмосферы СО РАН, 634055 Томск

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований зажигания лесных горючих материалов от реальных источников зажигания, действие которых моделируется эталонным источником. Определено время зажигания от эталонного источника. Даны оценки предельной энергии зажигания, проанализировано ее изменение в реальных условиях.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] дан краткий анализ существующих систем прогноза пожарной опасности и установлено, что их недостатком является игнорирование предельных условий зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ). Согласно [2] для построения физически содержательной методики прогноза пожарной опасности необходимо знать предельные условия зажигания ЛГМ. Известные методы исследования и теории воспламенения [3] нельзя в целом переносить на анализ режимов воспламенения и горения ЛГМ, поскольку агрегатное состояние, теплофизические и химические свойства такой своеобразной пористой реакционноспособной среды, как слой опада (сухая трава; опавшая хвоя; тонкие, диаметром до 7 мм веточки; живая трава) имеют свои существенные особенности.

В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований зажигания ЛГМ, представляющих собой слой хвои кедра с различным влагосодержанием W , высотой h и плотностью $\rho_{сл}$. Известно, что в реальных условиях зажигание слоя опада происходит в результате действия молний, тлеющих окурков палирос и сигарет, раскаленных углей из топок вагонов пассажирских поездов; непогашенных костров, а также при пятнистых лесных пожарах, вызванных выбросом горящих и тлеющих частиц в атмосферу и их оседанием на свежий слой ЛГМ. При моделировании возникновения лесных пожаров решены следующие задачи:

1) выполнено математическое моделирование зажигания ЛГМ;

2) проведено физическое моделирование свойств реального слоя ЛГМ и реальных условий зажигания ЛГМ в лабораторных условиях;

3) численно и экспериментально определены время зажигания и предельная энергия зажигания ЛГМ.

Все опыты проводили на установке, описание которой дано в [4]. Действие различных реальных источников зажигания сопоставлено с эталонным источником зажигания (ЭИ).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ЛГМ

Поставлена задача изучить механизм зажигания, определить время и минимальную энергию, необходимую для зажигания опада хвои кедра, нагреваемой нихромовой спиралью. В расчете спираль заменялась полым цилиндрическим телом в виде трубки с различной шероховатостью внешней поверхности. Рассмотрен случай, когда спираль вертикально помещена в слой опада хвои. При расчете теплообмена между нагреваемой спиралью и слоем ЛГМ учитывали кондуктивный и радиационный теплообмен между боковой поверхностью спирали и ЛГМ. Тепловые потери от спирали через верхнюю и нижнюю поверхности игнорировали. Полагали, что слой хвои при пожаре представлял собой пористую однотемпературную среду. Предполагалось, что она состоит из сухого органического вещества; воды, находящейся в связанном состоянии с сухим органическим веществом; конденсированных (кокс, зола) и газообразных продуктов пи-

¹Работа доложена на 2-й Международной конференции по лесным пожарам (Иркутск, 10–15 июня 1997 г.)

ролиза и горения. При исследовании учитывали пиролиз хвой, испарение влаги, реакции окисления оксида углерода и коксика. Задачу зажигания решали в сопряженной постановке, в рамках которой наиболее точно моделируется тепловое взаимодействие слоя хвой и спирали.

Описанная выше физическая задача сводится к решению системы уравнений сохранения массы исходного сухого конденсированного вещества ЛГМ (первое уравнение в (1)) и связанной с ЛГМ воды (второе уравнение в (1)), конденсированных (первое уравнение в (2)) и газообразных (уравнение (4)) продуктов пиролиза и продуктов горения в слое, уравнения неразрывности газовой фазы (3), а также закон сохранения массы золы (второе уравнение в (2)), уравнений сохранения энергии (5), уравнение сохранения кислорода, оксида углерода и паров воды (уравнение (4) при $\alpha = 1, 2, 3$) и количества движения (первое уравнение в (6)). Для вычисления скорости фильтрации газообразных продуктов пиролиза в порах слоя использовано уравнение движения в форме квадратичного закона Дарси. Приведенная ниже постановка задачи получена на основе математической модели тепло- и массопереноса при низовых лесных пожарах, данной в [1], которая после осреднения по вертикальной координате и записи уравнений в цилиндрической системе координат при некоторых упрощениях принимает вид:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -k_{s,1} \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{s,1}}{RT}\right) = -R_{s,1}, \quad (1)$$

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -k_{s,2} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_{s,2}}{RT}\right) = -R_{s,2};$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{s,3} - s R_{s,3}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_s s R_{s,3}, \quad (2)$$

$$\alpha_c = \frac{\nu'_3 M_3}{\nu_1 M_1}, \quad \alpha_s = \frac{\nu'_4 M_4}{\nu_c M_c};$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_5 \varphi_5 u) = R_5 - \frac{R_{5,w}}{h}, \quad (3)$$

$$R_5 = \alpha_g R_{s,1} + R_{s,2} + s R_{s,3}, \quad \sum_{i=1}^5 \varphi_i = 1;$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_5 \varphi_5 u c_\alpha) = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_5 \varphi_5 D_c \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \right) + R_{5,\alpha} + s R_{5,\alpha,s} - \frac{R_{5,\alpha,w}}{h}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{\alpha=1}^4 c_\alpha = 1, \quad \alpha_g = \sum_{j=2}^4 \frac{\nu'_j M_{5,j}}{\nu_1 M_1},$$

$$M_{5,j} = M_{5,\alpha}, \quad \alpha = j = 2, 4;$$

$$\begin{aligned} & \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p,5} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_{CO} R_{CO} + q_s s R_{s,3} - \\ & - q_{s,2} R_{s,2} - \frac{\alpha_1}{h} (T - T_e) - \frac{\alpha_2}{h} (T - T_s); \end{aligned} \quad (5)$$

$$u = -\frac{k}{\mu + k\beta\rho_5|u|} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (6)$$

$$p = \frac{\rho_5 R T}{M}, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_{5,\alpha}}.$$

Так как теплопроводность спирали значительно больше теплопроводности слоя хвой, распределением тепла в проволочке можно пренебречь. Поэтому систему уравнений (1)–(6) будем решать при следующих краевых условиях:

$$\begin{aligned} t = 0: \quad & \varphi_i = \varphi_i^0, \quad i = 1, 4, \quad c_\alpha = c_\alpha^0, \\ & \alpha = 1, 3, \quad \rho_5 = \rho_5^0, \quad T \Big|_{r \geq 0} = T^0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$r = r_0: \quad \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \quad u = 0, \quad (8)$$

$$\rho_0 c_0 \pi r_p^2 L_p \frac{dT_0}{dt} = 2\pi r_p H_0 \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial t} - \varepsilon_p \sigma T_0^4 \right) A_k + I^2 R_p;$$

$$r = r_\infty: \quad c_\alpha = c_\alpha^0, \quad T = T^0, \quad p = p^0.$$

В (1)–(8) r_0 — радиус спирали; R_p — сопротивление спирали; L_p, r_p — длина и радиус проволочки; H_0, h — высота спирали и толщина слоя опада (в данной задаче $H_0 = h$); r_∞ — константа, моделирующая бесконечность; T_0, ρ_0, c_0 — температура, плотность и удельная теплоемкость нихромовой проволочки; индекс 0 снизу приписывается величинам, характеризующим источник зажигания, а сверху — функциям в начальный момент времени; I — сила тока в цепи; ε_p — коэффициент черноты спирали; φ_i, ρ_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) — объемные доли и истинные плотности опада, воды, коксика, золы и газовой фазы соответственно; ν_1, ν'_3 и ν'_4, ν_c — стехиометрические коэффициенты реакций пиролиза и образования золы при горении коксика; M_c — атомарная масса коксика; $R_{s,3}$ — массовая скорость горения коксика; $s R_{s,3} = (M_c/M_{O_2}) s \rho_5 \varphi_5 c_1 k_s \varphi_3 \exp(-E_s/RT)$ — массовая скорость образования диоксида углерода в результате гетерогенной реакции горения коксика; s — удельная поверхность коксика; E_s ,

k_s , $E_{s,1}$, $k_{s,1}$ и $E_{s,2}$, $k_{s,2}$ — энергии активации и предэкспоненциальные множители гетерогенной реакции горения коксика, пиролиза ЛГМ и процесса испарения воды из ЛГМ соответственно; R_5 — массовая скорость образования газовой фазы вследствие протекания реакций внутри слоя; $R_{s,1}$, $R_{s,2}$ — массовые скорости пиролиза ЛГМ и испарения влаги из ЛГМ; μ — коэффициент молекулярной вязкости газовой фазы; k — коэффициент фильтрации; β — эмпирический коэффициент, называемый коэффициентом гидравлического сопротивления в порах; $R_{5,\alpha,w} = (\alpha_1 \varphi_5 / c_{p,5})(c_\alpha - c_{\alpha,e})$, $R_{5,w} = \rho_5 \varphi_5 v_w$ — члены, характеризующие массообмен α -компонента ($\alpha = 1, 2, 3, 4$ — кислород, оксид углерода, пары воды и инертные компоненты соответственно) и всей газовой фазы с окружающей средой; c_α — массовая концентрация α -компонента, $c_{\alpha,e}$ — массовая концентрация α -компонента на большом расстоянии от зоны пожара; v_w — линейная скорость выдува газообразных продуктов пиролиза и горения из слоя ЛГМ; u — скорость фильтрации газообразных продуктов в слое опада; T_s , T_e — температуры подстилающей поверхности и окружающей среды; $\lambda = \lambda_s + \lambda_R$ — эффективный коэффициент теплопроводности многофазной среды; $\lambda_s = \sum_{i=1}^5 \lambda_i \varphi_i$ — коэффициент теплопроводности многофазной среды; $\lambda_R = 16 \sigma T^3 / s$ — коэффициент лучистой теплопроводности; σ — коэффициент Стефана — Больцмана; $q_{s,2}$, q_s , q_{CO} — тепловые эффекты реакций испарения влаги, горения коксика и оксида углерода; α_1 , α_2 — коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен слоя ЛГМ с внешней средой и подстилающей поверхностью, $\alpha_1 = 10$ Вт/(м²·К), $\alpha_2 = 0,25$ Вт/(м²·К); D_α — коэффициент молекулярной диффузии α -компонента; $M_{5,\alpha}$ — молекулярные массы компонентов газовой фазы; M — молекулярная масса многокомпонентного газа; $c_{p,i}$ — удельная теплоемкость i -й фазы; t — время; r — цилиндрическая координата; p — давление газообразных продуктов в макропорах (под макропорами понимается пространство между хвоинками); R — универсальная газовая постоянная; α_c , α_g , α_s — доли коксика, газообразных продуктов, образующихся при пиролизе ЛГМ, и безразмерный стехиометрический коэффициент образования золы при горении коксика; A_k — коэффициент шероховатости внешней поверхности спирали, равный отношению произведения длины и радиуса ни-

хромовой проволоочки к удвоенному произведению длины и радиуса спирали, изготовленной из этой проволоочки; t_0 — время нагрева спирали. Скорость выдува газообразных продуктов из слоя опада вычисляли по эмпирической формуле [5, 6]. В уравнениях (4), (5)

$$R_{5,1} = -\frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} T^{-2,25} k_{O_2} \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0,25} \times \\ \times \frac{c_2 M}{M_2} \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right) = -\frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} R_{CO},$$

$$sR_{5,s,1} = -\frac{M_{O_2}}{M_C} sR_{s,3}, \quad R_{5,2} = \alpha_{CO} R_{s,1} - R_{CO},$$

$$R_{5,s,2} = R_{5,3} = 0, \quad sR_{5,s,3} = sR_{s,2},$$

где α_{CO} — доля оксида углерода, образующегося при пиролизе ЛГМ; M_C , M_{CO} , M_{O_2} — атомарная масса углерода и молекулярные массы оксида углерода и кислорода соответственно; c_1 — массовая доля окислителя, c_2 — горючего.

Краевую задачу (1)–(8) решали итерационно-интерполяционным методом [7]. Технология решения описана в работе [6]. Теплофизические постоянные взяты из [8, 9], а кинетические константы — из [10, 11]. При численном решении задачи определяли поле температур в различные моменты времени, находили минимальную энергию зажигания, а именно, определяли минимальное время нагрева спирали, при котором слой хвои загорелся, т. е. при $t > t_0$ член с $I^2 R_p$ в уравнении (8) занулялся.

На рис. 1,а представлены зависимости температуры спирали T_0 при зажигании ЛГМ от времени. Как показывает анализ кривых, температура проволоочки непрерывно растет во время действия электрического тока, а после его отключения — сначала падает вследствие теплоотдачи в слой ЛГМ, затем вновь растет в результате притока тепла от слоя ЛГМ после его зажигания. Время зажигания ЛГМ определяли по формуле

$$t_3 = t_* + (\Delta t)_*, \quad (9)$$

где t_* — время прогрева ЛГМ, при котором имеет место минимум T_* зависимости $T_0(t)$, а $(\Delta t)_*$ — период времени, в течение которого температура T_0 возрастает на $(\Delta T)_* = 5$ К от минимальной температуры T_* .

Такое определение согласуется с известным принципом Вант-Гоффа [12], по которому воспламенение реагирующего вещества происходит в то время и в той точке пространства,

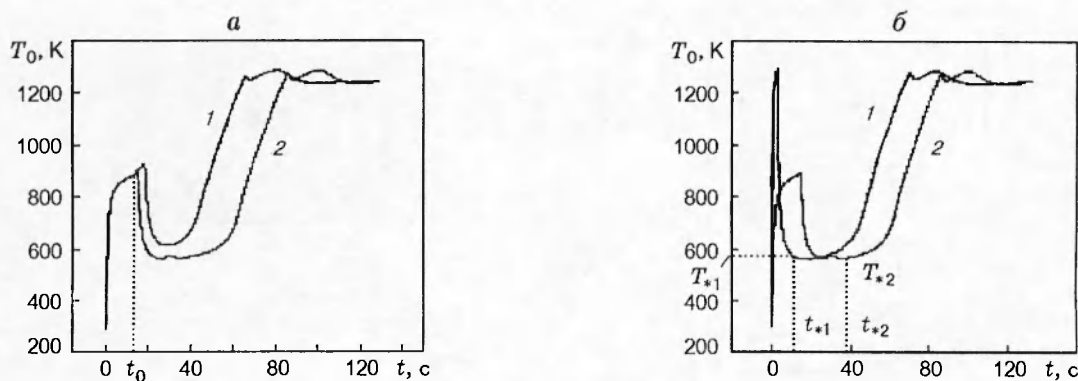


Рис. 1. Зависимость температуры спирали от времени для различных значений силы тока и разного времени его отключения:

$h = 5$ мм, $\rho_{сн} = 23,6$ кг/м³, $W = 8,7\%$; а: $I = 0,7$ А, $t_0 = 18,3$ (1) и $12,8$ с (2); б: 1 — $I = 1,5$ А, $t_0 = 4$ с, 2 — $I = 0,7$ А, $t_0 = 18,2$ с

где впервые теплоприход от химической реакции превышает теплоотвод. Очевидно, что прежде всего прогревается слой ЛГМ, примыкающий к нагретой спирали, поэтому после отключения спирали температура в точке $r = r_0$ вначале падает, а затем вновь растет вследствие выделения теплоты при окислении газообразных и конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ. При окислении газообразных горючих продуктов пиролиза возникает факел, который нагревает спираль, отключенную от электрического тока. В результате с ростом времени увеличивается температура T_0 . Такое определение времени зажигания согласуется с критерием зажигания (появление факела пламени), принятым при проведении экспериментальных исследований. Величина $(\Delta T)_*$ выбрана из условия наилучшего согласования теоретических и экспериментальных результатов.

Поведение кривых зависимости $T_0(t)$ на рис. 1 согласуется с физическими соображениями, приведенными выше. В результате математических экспериментов установлено минимальное критическое время отключения t_{*0} , при котором еще происходит зажигание напочвенного покрова. Сразу после отключения при $t > t_0$ значение T_0 убывает до момента $t = t_*$. Из рис. 1,а видно, что чем меньше значение t_0 , тем больше время зажигания. При достаточно малом времени нагревания спирали выделившейся тепловой энергии не хватает для зажигания ЛГМ и температура T_0 убывает со временем. Следует заметить, что минимальная энергия зажигания является линейной функцией времени нагрева, т. е. погрешность опре-

деления минимальной энергии прямо пропорциональна погрешности определения времени нагрева спирали. При проведении численных расчетов минимальное время нагрева спирали, при котором происходит зажигание, определялось с точностью до 1%.

Как следует из анализа графиков рис. 1,б, после отключения тока в цепи температура спирали достаточно быстро уменьшается до температуры T_* , а после зажигания возрастает до температуры горения. Любопытно, что значения T_{*1} и T_{*2} , соответствующие временам прогрева t_{*1} и t_{*2} , практически совпадают друг с другом. Следует заметить также, что, как показали расчеты, примерно через 3 мин после зажигания, когда фронт горения отходит от спирали, отключенная спираль начинает вновь достаточно быстро охлаждаться вследствие теплоотвода в относительно холодные продукты горения ЛГМ (пепел и недожог — остатки неположительно сгоревших элементов ЛГМ).

На рис. 2 даны зависимости времени зажигания t_3 слоя опада хвои кедр с $W = 8,7\%$ от мощности источника N . Видно, что кривые 1 и 2 эквидистантны друг другу, но кривая 2 лучше согласуется с экспериментальными данными. Кроме того, чем больше мощность эталонного источника зажигания, тем меньше время зажигания, что согласуется с априорными физическими соображениями. Как следует из анализа кривых на этом рисунке, существует вертикальная асимптота, т. е. минимальная мощность источника N_{\min} . При $N < N_{\min}$ зажигания ЛГМ не происходит ($N_{\min} \approx 4$ Вт). С ростом N время зажигания падает, но вели-

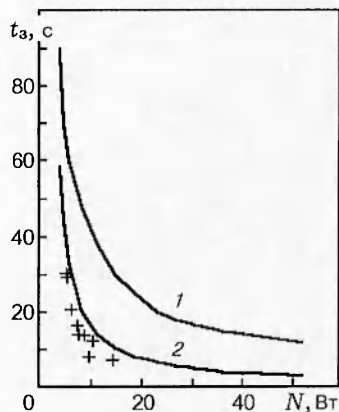


Рис. 2. Зависимость времени зажигания ЛГМ от мощности эталонного источника зажигания:

1 — время зажигания — момент времени, соответствующий точке перегиба (критерий зажигания О. М. Тодеса [3]) кривой $T_0(t)$ (см. кривые 1, 2 на рис. 1); 2 — время зажигания, определяемое по (9); + — экспериментальные данные

чина t_3 имеет горизонтальную асимптоту. Таким образом, при любой сколь угодно большой мощности источника время зажигания не может быть равно нулю.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭИ

В опытах слой ЛГМ представлял собой совокупность хвоинок и тонких веточек кедра (*Pinus Sibirica*), равномерно разложенных на поверхности слоя почвы [4], который моделирует реальную подстилающую поверхность в лесу; $h = 5 \div 40$ мм, запас ЛГМ $m_3 = \rho_{сл} h = 0,9 \div 3$ кг/м², $W = 0 \div 18$ %. С точки зрения механики сплошной среды слой ЛГМ является рыхлой, пористой средой, основа которой совокупность включений (хвоинок и тонких веточек), а макропоры — пространство между ними. Макропористость слоя ЛГМ изменялась в пределах $0,7 < \varphi_5 < 0,998$, пористость включений (микропористость) полностью соответствовала реальной. Включения были хаотически ориентированы относительно вертикали. Диапазоны изменения характеристик слоя ЛГМ ($\rho_{сл}$, φ_5 , W) и его состав соответствовали характеристикам реального слоя ЛГМ в лесных фитоценозах. Поэтому можно считать, что слой ЛГМ, созданный в лабораторных условиях, воспроизводил основные свойства реального слоя опада в кедровом лесу.

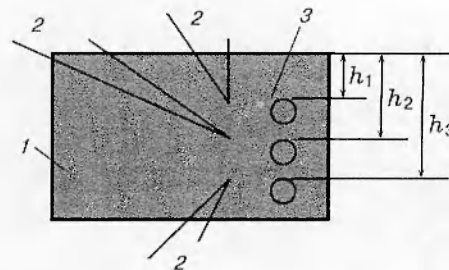


Рис. 3. Схема опыта по изучению зажигания ЛГМ от эталонного источника зажигания:

1 — слой ЛГМ, 2 — хромель-алюмелевые термопары с толщиной спая 0,2 мм, 3 — эталонный источник

В качестве наиболее вероятных источников зажигания ЛГМ использованы реальные инициаторы горения (горящая спичка, тлеющая веточка, горящая веточка и тлеющая сигарета). Наряду с ними применялся эталонный источник зажигания, выполненный в виде спирали плотной намотки. Спираль ЭИ изготавливали из нихромовой проволоки диаметром 0,15 мм. Внешний диаметр спирали 1,5 мм, длина 20 мм, сопротивление 23 Ом. Спираль ЭИ накалялась регулируемым источником тока до температуры $700 \div 1300$ К. Этот диапазон температуры соответствует реальным источникам пожарной опасности, за исключением молнии. Поскольку в естественных условиях источники зажигания могут находиться на поверхности слоя ЛГМ или же внедряться в него на некоторую глубину, в опытах источники располагали в слое ЛГМ на трех уровнях: $h_1 = 5$ мм, $h_2 = 10$ мм и $h_3 = 15$ мм от поверхности. На этих же уровнях для сравнения размещали и ЭИ. Схема опыта приведена на рис. 3.

Под зажиганием слоя ЛГМ понималось возникновение факела пламени над слоем ЛГМ. Момент зажигания фиксировался несколькими способами. Самый простой — визуальный с использованием секундомера. Другой способ основан на фиксации термопарами резкого повышения температуры слоя ЛГМ в момент зажигания. Термопары располагали на тех же уровнях, что и ЭИ, на расстояниях от него, не превышающих диаметра хвоинки ($\approx 0,8$ мм). Сигнал термопары регистрировался шлейфовым осциллографом Н-117. Погрешность измерения времени зажигания составляла 2,5%.

Для того чтобы оценить, какой источник

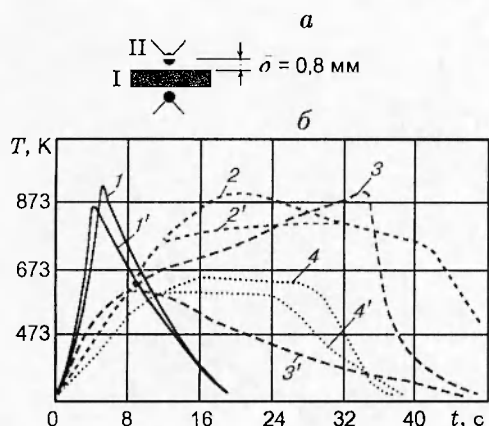


Рис. 4. Расположение объекта измерения температуры и термопары (а) и зависимость температуры ЛГМ от времени в зоне, примыкающей к реальному источнику зажигания (б):

I — объект, II — термопара; 1, 1' — спичка; 2, 2' — окурок; 3, 3' — горящая веточка; 4, 4' — тлеющая веточка; кривые без штриха соответствуют положению объекта под термопарой, со штрихом — над термопарой

зажигания ЛГМ наиболее пожароопасен, были проведены экспериментальные исследования температур пламен различных источников зажигания.

На рис. 4,а представлена схема проведения измерений, на рис. 4,б — результаты измерения температуры вблизи различных источников зажигания. Видно, что наибольшую температуру имеет пламя горящей спички (кривые 1 и 1'). Наиболее близка к ней температура, создаваемая тлеющей сигаретой (кривые 2 и 2'). Причем время достижения максимального значения температуры составляет $\approx (18 \div 20)$ с от момента внесения сигареты в зону действия термопар. Высокую температуру, близкую к температуре пламени от горящей спички, дает горящая с факелом пламени веточка (кривые 3 и 3'), но время достижения максимума температуры при этом возрастает примерно до 35 с. Отличие между кривыми 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3' вызвано различным положением термопар относительно горящего образца. Видно, что температура под горящей веточкой существенно ниже температуры над ней. Однако она достаточно высока (см. кривую 3' в момент времени 8 с) и может поджечь ЛГМ при попадании на него. Вблизи тлеющей веточки также имеется зона с высокой температурой, способной вызвать зажигание ЛГМ. Из приведенных гра-

фиков изменения температур в зонах, близких к источнику пламенного горения ($\delta \approx 0,8$ мм), видно, что все источники могут быть инициаторами горения ЛГМ, но с различным временем зажигания. Например, горящая спичка может поджечь горючие материалы за небольшой интервал времени ($2,5 \leq t \leq 11$ с), а для тлеющей сигареты время сохранения температуры выше 573 К может составлять 39 с.

В опытах спираль располагалась либо вертикально (ось симметрии перпендикулярна горизонтальной подстилающей поверхности), либо горизонтально. Данные рис. 2 соответствуют вертикальному положению оси симметрии ЭИ и заглоблению источника в соответствии с постановкой задачи.

Сравнивая теоретические кривые (см. рис. 1) с экспериментальными, приведенными на рис. 5, заключаем, что теоретические и экспериментальные результаты качественно согласуются. Моменту зажигания ЛГМ (см. рис. 5,а) соответствует точка перегиба температурной кривой. Отличие заключается в том, что экспериментальные кривые получены при непрерывном нагреве спирали электрическим током, поэтому на них отсутствует участок падения температуры. Как показывают наблюдения, при контакте источников зажигания со слоем ЛГМ имеют место прогрев и сушка включений, а затем — пиролиз ЛГМ, который идентифицировался по появлению дыма. После некоторого периода тления газообразные продукты пиролиза воспламеняются, и появляется факел пламени. Эти наблюдения и механизм зажигания подтверждают результаты [13]. Следует отметить, что если количество энергии, переданное нагревателем слою ЛГМ, было меньше критического или запас ЛГМ был меньше $0,7 \text{ кг/м}^2$, пламенное горение не возникло, а имело место только тление.

Представляет интерес определение предельного (минимального) значения энергии реального источника, при котором слой ЛГМ еще воспламеняется. Однако непосредственно определить из эксперимента минимальную энергию зажигания от реальных источников не представляется возможным. Это делается косвенным путем — сравнением времени зажигания от реальных источников с временем зажигания от ЭИ. Так, на рис. 6,а представлены графики зависимости времени зажигания слоя ЛГМ (кедрового опада) от мощности горизонтально расположенного ЭИ при его контактном взаимодействии с ЛГМ. Видно, что время t_3 при

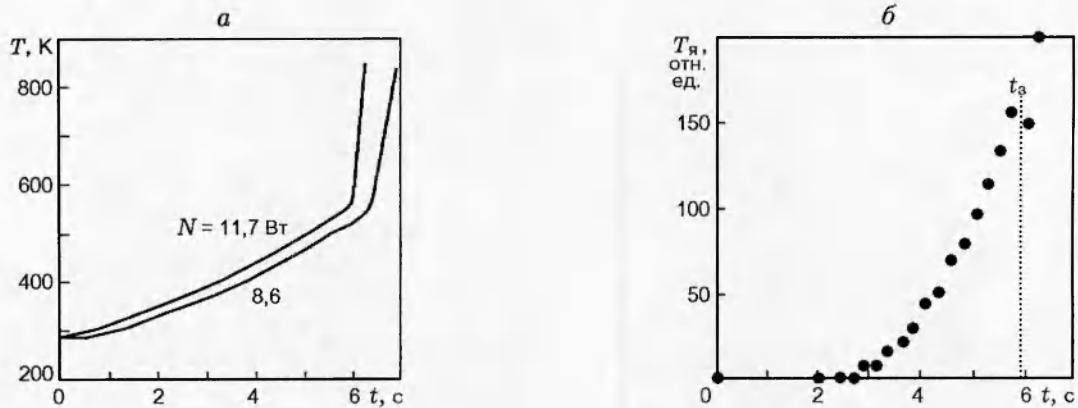


Рис. 5. Зависимости термодинамической (а) и яркостной (б) температур ЛГМ вблизи эталонного источника зажигания при его горизонтальном положении от времени

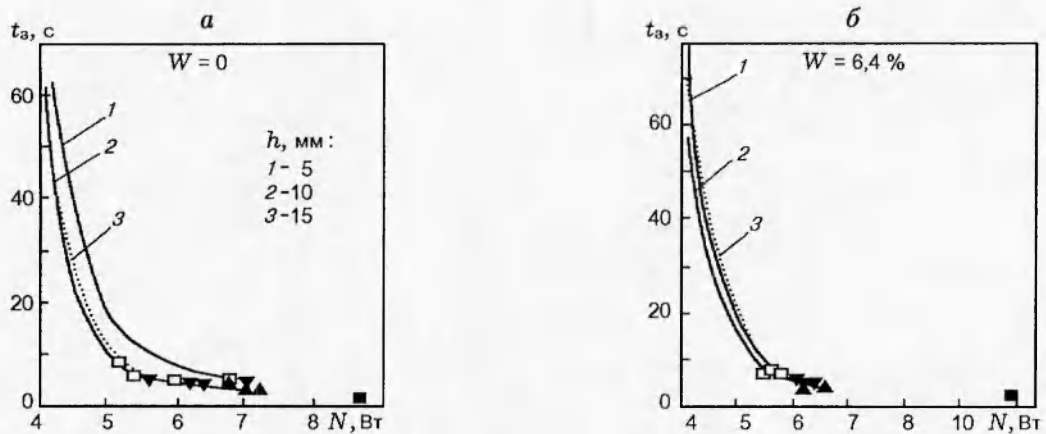


Рис. 6. Зависимость времени зажигания от мощности ЭИ при различном заглублении спирали и влагосодержании ЛГМ:

▼ — тлеющая сигарета, ▲ — горящая веточка, □ — тлеющая веточка, ■ — горящая спичка

мощности $N_{\min} \approx 4,20$ Вт асимптотически стремится к бесконечности. По мере увеличения N время зажигания убывает, приближаясь к своему минимальному значению. Видно, что наибольшее расхождение по времени зажигания отмечается при $N_{\min} < N < 5,4$ Вт. При $N > 5,5$ Вт времена зажигания для всех случаев становятся практически одинаковыми. Причем при размещении спирали на глубине $h = 10$ и 15 мм времена зажигания практически совпадают. Расхождение времен t_3 отмечается только для $h = 5$ мм.

Сопоставление значений t_3 для ЭИ и реальных источников показывает, что мощность этих источников охватывает диапазон $5,5 \div 6,5$ Вт. При поджиге ЛГМ от спички $N \approx$

10 Вт. Для рассматриваемого случая при $N \approx 10$ Вт время $t_3 \approx 1$ с.

Поскольку графики изменения t_3 от N (см. рис. 6) имеют асимптоты по осям, легко установить минимальное время зажигания ЛГМ [13]. Исходя из этого можно определить и минимальную энергию зажигания. Так, перпендикуляр к оси N , одновременно касающийся кривой 1, соответствует мощности, при которой хвоя не воспламеняется. Горизонтальная асимптота характеризует минимальное время зажигания ЛГМ. Произведение $N_{\min}(t_3)_{\min}$ дает значение минимальной энергии ЭИ, ниже которой зажигание не происходит.

Зависимости минимальной мощности от глубины расположения ЭИ в слое ЛГМ приве-

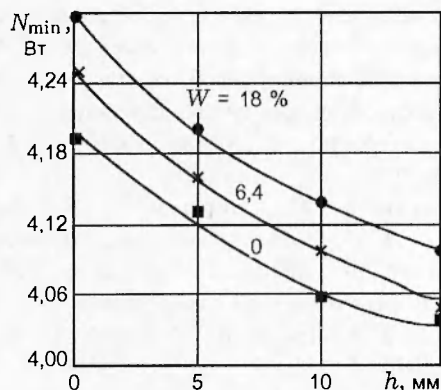


Рис. 7. Зависимость предельной (минимальной) мощности источника зажигания от глубины залегания ЭИ

дены на рис. 7. Видно, что при большем заглублении ЭИ в слой ЛГМ он блокируется от окружающей среды. В результате снижается теплообмен со средой, и все тепло, выделяемое ЭИ, идет на разогрев окружающего его ЛГМ. Поэтому с ростом глубины погружения ЭИ в слой ЛГМ время зажигания уменьшается.

Любопытно, что зажигание ЛГМ при определенных значениях длительности действия электрического тока t_0 и мощности N происходит даже при влагосодержании ЛГМ, превосходящем критическое значение $W_* = 13\%$, при котором еще имеет место распространение фронта низового лесного пожара [13]. Это объясняется дополнительным поступлением теплоты от ЭИ. Следует отметить, однако, что через некоторое время после зажигания происходит потухание очага пожара при избыточном влагосодержании ЛГМ.

Относительная погрешность определения зависимости $t_3(N)$ не превышала 13%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ СЛОЯ ЛГМ

Для тепловизионного исследования формирования и развития низового лесного пожара, инициируемого точечным источником зажигания, использовали сухую кедровую хвою с $W \approx 5\%$, массой 185 г, выложенную слоем $h = 40$ мм по кругу диаметром $\approx 0,5$ м с плотностью $23,6 \text{ кг/м}^3$, и запасом горючего материала $0,9 \text{ кг/м}^2$.

Регистрировались поля яркостной температуры в диапазоне длин волн $3 < \lambda < 5$ мкм. Связь между яркостной и термодинамической температурами можно установить с помощью

соотношений, принятых в оптической пирометрии [14]. Поэтому, проводя тепловизионные съемки процесса горения ЛГМ с применением двух тепловизоров и двух длин волн, можно, зная яркостные температуры, найти термодинамическую температуру пламени горения ЛГМ в очаге лесного пожара в различные моменты времени. В данной работе использовали только один тепловизор АГА-780, поэтому количественных сведений о полях термодинамической температуры получить не удалось.

Время зажигания определяли по изменению яркостной температуры в зоне, примыкающей к спирали. В момент возникновения пламенного горения резко возрастает градиент яркостной температуры. Временной диапазон (от момента начала прогрева ЛГМ до воспламенения) определяли из соотношения

$$t_3 = K \Delta t, \quad (10)$$

где K — число кадров, зарегистрированных до момента резкого увеличения градиента температуры (определяется по тепловизионным снимкам возникновения и развития пожара); $\Delta t = 0,04 \Delta N$ [с] — время между регистрируемыми кадрами, ΔN — число пропущенных между регистрациями кадров. Методика проведения тепловизионных исследований приведена в работе [4], а компьютерной обработки тепловизионной информации — в [15].

Изменение яркостной температуры зоны инициирования воспламенения ЛГМ показано на рис. 5, б. Видно, что до $t = 2$ с после включения источника питания ЭИ спираль нагревается, после этого она начинает светиться, что просматривается визуально, поскольку ЛГМ — пористая, частично прозрачная среда. Повышение температуры близлежащего слоя ЛГМ отмечается спустя 2,8 с от момента включения ЭИ. Зажигание ЛГМ (возникновение пламенного горения) происходит через 5,84 с от момента подачи электрического тока на спираль ЭИ. Контрольный опыт проводили при $N = 7$ Вт и $W = 0$. Спираль ЭИ располагали горизонтально на глубине $h = 5$ мм под поверхностью слоя ЛГМ. Сравнение с графиками времени зажигания, которое определяли термометрическим методом, дает хорошее совпадение. Различия значений t_3 , полученных с помощью термометрической и тепловизионной методик, не превышает 16%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные расчетно-экспериментальные результаты позволяют глубже понять

механизм зажигания ЛГМ. Разработана новая термодинамико-тепловизионная методика определения времени зажигания ЛГМ. Получены зависимости времени зажигания слоя ЛГМ от мощности источника зажигания для различных значений высоты слоя и влагосодержания ЛГМ. Анализ экспериментальных результатов показывает, что реальные источники зажигания ЛГМ (тлеющая сигарета, горящая спичка, тлеющая веточка, горящая веточка) обладают достаточной энергией для зажигания. Приведена методика определения этой энергии, основанная на сравнении времен зажигания от реальных источников зажигания и эталонного источника, тепловая энергия которого регулируется. Определена предельная энергия зажигания для конкретного вида опада ЛГМ (хвоя кедр).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
2. Гришин А. М. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена в лесных фитоценозах и аэрокосмический мониторинг лесов // Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики: Материалы Междунар. симпоз. Томск: Сиб. физико-техн. ин-т, 1996. С. 41–43.
3. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. М.: Наука, 1980.
4. Гришин А. М., Долгов А. А., Зима В. П. и др. Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 6. С. 3–10.
5. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983.
6. Звягильская А. И., Субботин А. Н. Влияние влагосодержания и тепло- и массообмена с окружающей средой на критические условия возникновения очага низового пожара // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 5. С. 99–106.
7. Гришин А. М., Берцун В. Н., Зинченко В. И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
8. Теплотехнический справочник: В 2 т. / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976. Т. 2.
9. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
10. Гришин А. М., Перминов В. А. Математическое моделирование зажигания полога леса от Тунгусского метеорита с учетом двухтемпературности среды // Сиб. физ.-техн. журн. 1992. Вып. 6. С. 107–111.
11. Гришин А. М., Сеницын С. П., Акимова И. В. Сравнительный анализ термодинамических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 17–23.
12. Вант-Гофф. Очерки по химической динамике. Л.: Химтеоретиздат, 1936.
13. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.
14. Драгун В. Л., Филатов С. А. Тепловизионные системы в исследованиях тепловых процессов. Минск: Наука и техника, 1989.
15. Доботкин А. А., Исаков А. В., Ильин А. Б. и др. Блок регистрации и ввода информации с тепловизора в ЭВМ «Термик-2» // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7, № 5. С. 673–679.

Поступила в редакцию 18/VIII 1997 г.