

**А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, В.В. Рейно, Р.Ш. Цвык**

## **ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА**

Рассмотрены результаты применения тепловизионной методики для исследования динамики изменения поля яркостной температуры низовых лесных пожаров в лабораторных условиях от линейного и точечного источников поджига. Анализируются динамика некоторых характеристик (скорость движения фронта горения, размеров пламени, полной энергии и др.) и изменения поля яркостной температуры во времени. Получены эмпирические соотношения, описывающие изменения этих характеристик на различных стадиях горения.

Низовые лесные пожары (НЛП) – наиболее распространенный в природе тип лесного пожара, приносящего огромный экологический и экономический ущерб. Несмотря на достаточно большое количество экспериментальных работ [1–3], посвященных исследованию НЛП, до сих пор не решены вопросы о преобладающем механизме переноса энергии из зоны реакции в свежий горючий материал. Неизвестны точные профили концентраций продуктов горения во фронте пожара и недостаточно исследованы предельные условия его распространения. Для обнаружения лесных пожаров начинают использовать пассивные оптико-электронные системы [4, 5], размещаемые на космических аппаратах. Однако для оценки эффективности космических средств, методик идентификации, классификации и прогноза развития лесных пожаров необходимо знать тепловые потоки в заданных спектральных интервалах, ослабление излучения атмосферой, частицами дыма и кроной деревьев, эффективные площади горения в зависимости от типа пожара и некоторые другие характеристики. Кроме того, необходимо учитывать, что процесс горения лесных горючих материалов (ЛГМ) зависит от их плотности, влажности, начальной температуры, а также от влажности и температуры окружающей среды, скорости и направления ветра, угла наклона рельефа.

Изучение НЛП в натуральных крупномасштабных экспериментах затруднено из-за плохой воспроизводимости результатов и большой зависимости параметров горения от внешних факторов. В основном эта проблема решается с помощью лабораторных устройств, позволяющих с некоторыми допущениями частично моделировать условия возникновения и распространения низовых лесных пожаров. Так, в работах [6–8] описаны установки для физического моделирования НЛП в специализированных аэродинамических трубах. Однако этот способ имеет неустранимый недостаток, обусловленный тем, что реальный процесс горения ЛГМ в открытом пространстве моделируется горением ЛГМ в полузамкнутом пространстве, в котором проводятся опыты. Замкнутость пространства в специализированных аэродинамических трубах приводит к изменению температуры и состава среды и влияет на поля скоростей фронта пожара в результате изменения силы тяги в зоне НЛП. Тем не менее экспериментальные работы по изучению пожаров в лабораторных условиях продолжают. При этом создаются новые лабораторные установки, позволяющие расширить диапазон исследований горения ЛГМ с более точным приближением к реальным условиям. В отличие от натуральных исследований лабораторные работы можно проводить круглый год с меньшими материальными затратами.

### **Методика измерений**

В работе [9] рассмотрены установка и методика исследований процесса возникновения и развития низового лесного пожара в модельных условиях с применением тепловизионной методики. Основное преимущество тепловизионных систем заключается в их высоком пространственном и временном разрешении. На данном этапе эта методика позволяет успешно исследовать динамику изменения полей яркостной температуры, получить некоторые характеристики процесса горения ЛГМ, как количественные (скорость распространения, размеры, форма пламени), так и качественные (относительные изменения максимальной температуры, полной энергии и др.). Для

получения количественных данных по энергетическим и температурным характеристикам процесса горения требуются измерение абсолютных величин световых потоков и, как следствие, калибровка тепловизора в диапазоне температур 300–1300°C. Кроме того, необходимо решить проблему излучательной способности пламени в различных спектральных интервалах, которая зависит от концентрации аэрозольных частиц, паров воды и углекислого газа [10]. Решение этой задачи позволит получить данные, необходимые для разработки и уточнения методик обнаружения с помощью спутников пожаров на ранних стадиях, оценки их мощности, прогноза развития.

В состав модельной установки [9] входят стол-полигон размером  $1,3 \times 0,75 \text{ м}^2$ , засыпанный почвой слоем 0,1 м (поверх ее укладывалась навеска исследуемого горючего материала), система датчиков с регистрацией информации на ЭВМ, устройство поджига от спирали заданной формы (протяженная или малогабаритная спираль из вольфрама), тепловизионная система АГА-780 (диапазон длин волн 3–5 мкм), дополненная специальным программируемым блоком Термик-2 [11] и ЭВМ IBM PC AT. Применение программируемого блока позволяет регистрировать динамику изменения процессов, протекающих с различными скоростями, например путем пропуска заданного количества кадров.

В данной статье рассматриваются результаты экспериментального исследования (на модельной установке) развития НЛП от линейного и наиболее вероятного точечного источников возгорания. Тепловизор, установленный на расстоянии 6–7 м от стола-полигона, измеряет тепловой поток излучения пламени с каждой элементарной площадки. Количество таких площадок в каждом кадре  $95 \times 95$  (задается программно). Тепловизор был поднят на высоту  $\approx 1,5$  м над плоскостью стола-полигона. Это позволило регистрировать форму и размер фронта горения от точечного источника по всем трем осям ( $X$ ,  $Y$  – в плоскости стола и  $Z$  – вертикальная). При линейном источнике поджига тепловизор устанавливался на уровне стола-полигона. Основные результаты исследований от линейного источника приведены в [12].

При обработке полученных результатов при точечном источнике в каждом кадре определялись следующие параметры процесса горения: координаты левой  $X_{л}$  и правой  $X_{п}$  сторон фронта горения по горизонтальной оси  $X$ , нижняя (передняя) координата по оси  $Y$  (вторая координата  $Y$  скрыта пламенем и не видна на термограммах); верхняя координата высоты пламени  $Z$  (вертикальная ось), относительная яркостная максимальная температура  $T_m$ , величина  $P$ , пропорциональная энергии пожара за время 0,04 с, проекция площади поверхности пламени  $S$ . Уровень сигнала, на котором определялись координаты, равнялся 9–20 относительным единицам яркостной температуры, что составляло  $\sim 10\%$  от максимальной величины, регистрируемой тепловизором. За начало координат  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  принята точка максимальной температуры в момент поджига. Для определения пространственного разрешения регистрировалось изображение нагретой прямоугольной пластины, размещенной в плоскости стола полигона. Пространственное разрешение между двумя точками изображения по осям  $X$ ,  $Z$  составило 7,7 мм, по оси  $Y$  – 30,6 мм, что связано с расположением тепловизора относительно стола полигона. Общее время регистрации составляло  $\approx 120$ –240 с, в зависимости от количества пропускаемых кадров. Время регистрации одного кадра 0,04 с, промежуток времени между регистрируемыми кадрами 1,2–2,4 с (регистрация проводилась в режиме пропуска 30–60 кадров). При линейном источнике поджига разрешение по вертикали и горизонтали составляло 11,2 мм.

Методика обработки заключалась в следующем. Для точечного источника пожара из координат  $X_{л}$ ,  $X_{п}$ ,  $Z$ , определяемых по изображениям, рассчитывались диаметры кольца фронта горения по осям  $x$  и  $y$  –  $D_x(t)$ ,  $D_y(t)$  и высота пламени  $h(t)$  по формулам:  $D_x(t) = X_{п}(t) - X_{л}(t)$ ;  $D_y(t) = 2(Y(t) - Y_0)$ ,  $h(t) = Z(t) - Z_0$ . При обработке данных уравнения линий регрессии определялись методом наименьших квадратов. Программно в каждом кадре (время одного кадра 0,04 с) определялись и рассчитывались максимальная температура, общая энергия и площадь поверхности пламени путем суммирования по области пламени. При нелинейном изменении процесса во времени аппроксимирующие уравнения подбирались методом подбора, исходя из физики процесса.

## Результаты измерений

В качестве горючего материала при линейном источнике пожара в экспериментах применялась сухая кедровая хвоя (влажность  $\omega \approx 13\%$ , масса 0,2 кг), выложенная слоем  $h \approx 0,02$  м по поверхности стола-полигона (плотность  $\rho \approx 20 \text{ кг/м}^3$ , запас горючего материала  $m_3 \approx 0,42 \text{ кг/м}^2$ ); при точечном источнике пожара (влажность  $\omega \approx 13\%$ , масса 0,185 кг) – выложенная слоем  $h \approx 0,04$  м

по кругу (диаметр  $D = 0,5$  м, плотность  $\rho \approx 23,6$  кг/м<sup>3</sup>, запас горючего материала  $m_3 \approx 0,9$  кг/м<sup>2</sup>). В соответствии с классификацией [13] реализуется слабый низовой лесной пожар.

В процессе пожара выделяются 3 стадии развития [1]. Первая – стадия загорания и формирования фронта пожара, период времени  $0 < t < t_1$ . Вторая – стадия стационарного горения,  $t_1 < t < t_2$ . Третья – стадия затухания,  $t_2 < t < t_3$ . Параметры процесса горения различны для каждой из стадий.

Анализ изменения формы пламени позволяет отметить следующее. Форма пламени очага пожара от точечного источника и от пожара, возникшего от линейного источника, существенно различна. Это иллюстрируется средней за время горения формой пламени от линейного (рис. 1,а) и от точечного источников (рис. 1,б). На рис. 1 по осям отложены номера точек в изображении. Для линейного источника характерна постоянная средняя форма пламени в процессе горения, похожая на несимметричную гауссоиду. Форма пламени от точечного источника в течение первых  $\sim 60$  с в среднем близка к цилиндру, переходящему затем в конус, радиус основания и высота которого растут со временем, затем она переходит в усеченный конус и в конце процесса горения в горящее кольцо (после 100 с, когда догорают остатки горючего материала). Время перехода формы пламени от конуса к усеченному конусу совпадает с временем уменьшения скорости движения фронта (рис. 2), скорости изменения (стабилизации) высоты пламени, максимальной температуры (рис. 3), площади поверхности пламени (рис. 4) и полной энергии (рис. 5). Такую форму пламени можно объяснить тем, что при кольцевом пожаре существующий приток воздуха вдоль переднего фронта горения более мощный, чем на внутреннем (внутри очага горения) фронте, и скорость процесса горения внутри очага идет более замедленно. Кроме того, недостаток воздуха, его высокая температура и скорость подъема за счет сил плавучести приводят к понижению давления внутри очага и сжатию пламени в конус. При исследовании линейного пожара средняя ширина фронта горения и полная энергия [6] изменялись слабо (исключая начало и конец процесса горения). В кольцевом пожаре полная энергия непрерывно растет до момента достижения фронтом горения края ЛГМ.

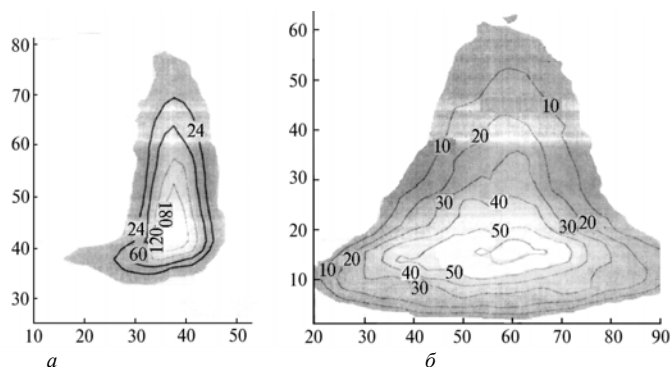


Рис. 1. Средняя форма пламени от пожара: а – линейный источник; б – точечный

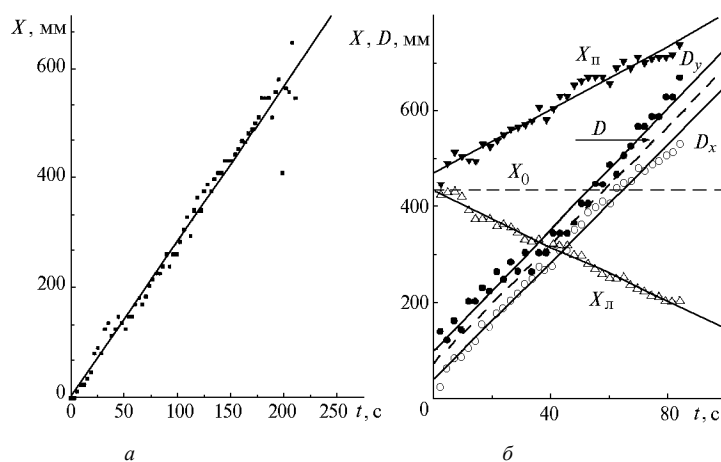


Рис. 2. Движение фронта пожара во времени (а – линейный, б – точечный источники поджига)

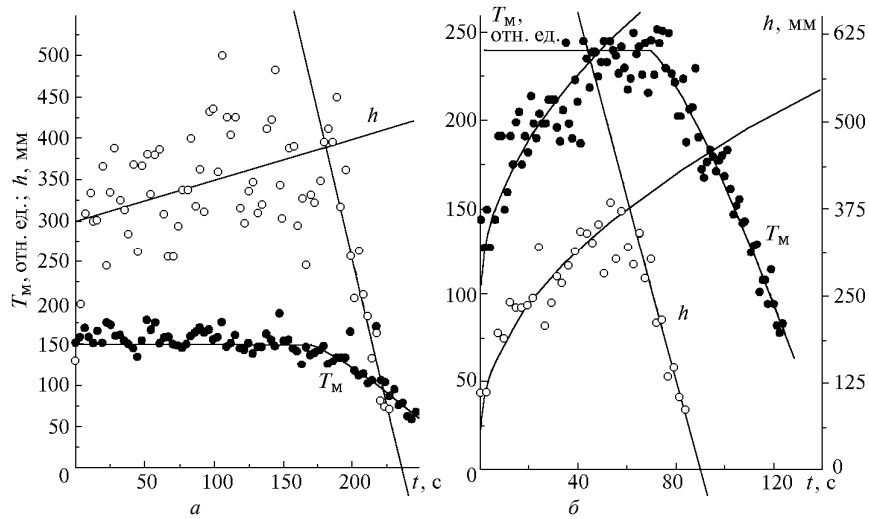


Рис. 3. Изменение максимальной температуры  $T_M$  и высоты пламени  $h$  от времени ( $a$  – линейный,  $b$  – точный источники поджига)

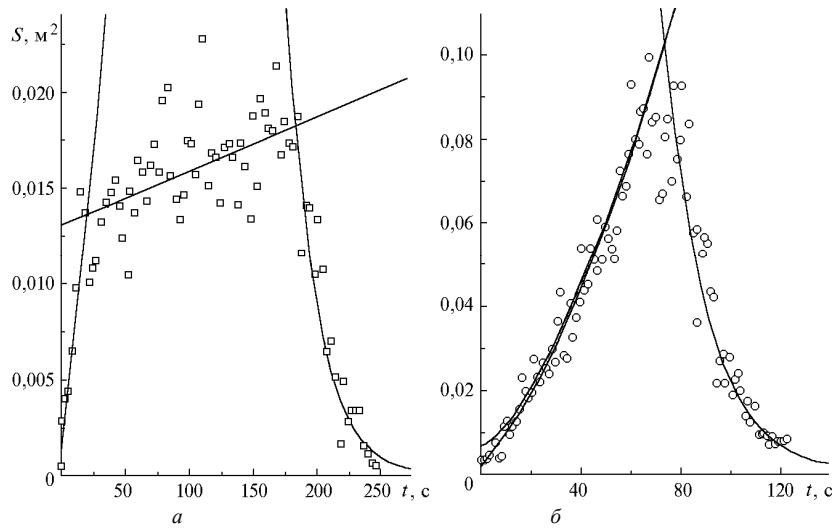


Рис. 4. Изменение площади поверхности  $S(t)$  пламени во времени ( $a$  – линейный,  $b$  – точный источники поджига)

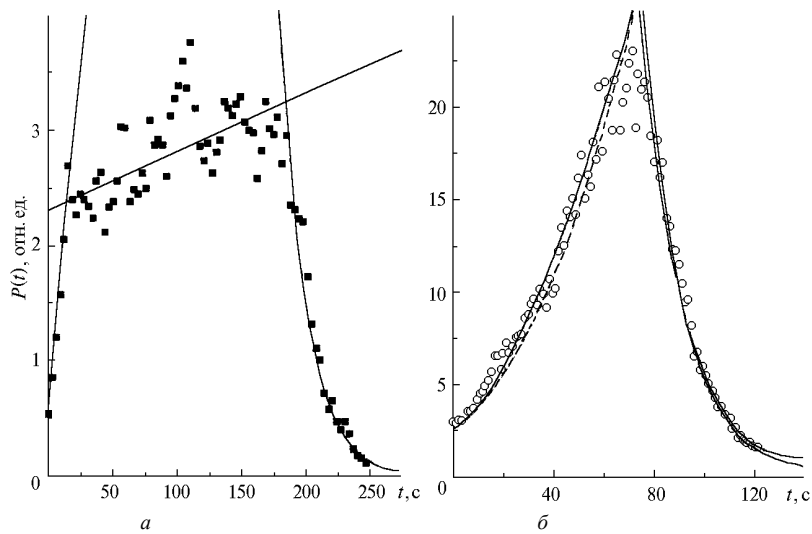


Рис. 5. Изменение пламени  $P(t)$  во времени ( $a$  – линейный,  $b$  – точный источники поджига)

Известно, что процесс горения характеризуется скоростью движения фронта  $U_\phi$ , максимальной температурой  $T_m$ , высотой пламени  $h$ , площадью поверхности пламени  $S$ , энергией излучения  $P$ , плотностью энергии излучения пламени  $W$  и флуктуациями этих параметров. Рассмотрим каждый из названных параметров.

### Скорость распространения фронта пожара

На рис. 2,а приведены результаты измерения координаты  $X_m$  движения точки максимальной температуры в направлении распространения фронта пожара (ось  $X$ ) от линейного источника во времени. Уравнение, рассчитанное методом наименьших квадратов, имеет вид

$$x_m(t) = A + U_\phi t = 2,84 t. \quad (1)$$

На рис. 2,б для пожара от точечного источника приведен пример изменения во времени координат  $X_n$ ,  $X_p$ , диаметров фронта по осям  $D_x(t)$ ,  $D_y(t)$  и среднеквадратического диаметра  $D(t) = \sqrt{[D_x^2(t) + D_y^2(t)]/2}$ . По вертикальной оси отложены координаты и размеры в миллиметрах, по горизонтальной – время  $t$  в секундах. Прямые, приведенные на рисунке, рассчитаны методом наименьших квадратов с использованием уравнения первого порядка  $F(x) = A + U_\phi t$ , где  $A$  и  $U$  – постоянные, определяющие значение  $F(x)$  в нуле и скорость изменения функции. Уравнения прямых имеют вид

$$\begin{aligned} x_n(t) &= 431 + 2,82 t; & x_p(t) &= 470 + 3,33 t; \\ D_x(t) &= 38,8 + 6,15 t; & D_y(t) &= 96,7 + 6,38 t; \end{aligned} \quad (2)$$

$$D(t) = A + 2U_\phi t = 73 + 6,2 t.$$

Коэффициент корреляции равен 0,98–0,99.

Как видно из рис.2,б и уравнения (2), при отсутствии скорости ветра фронт горения распространяется со средней постоянной скоростью  $U_\phi = 3,1$  мм/с во всех направлениях, т.е. по форме он близок к кругу, диаметр которого  $D(t)$  увеличивается со скоростью 6,2 мм/с. Скорость распространения флуктуирует с частотами выше 0,05 Гц. Измеренная скорость движения фронта горения 3,1 мм/с близка к расчетной скорости, определенной, например, по формуле работы [1] и равной  $U_\phi^p = U_\infty [1 - \exp(-4 m_3)] = 3$  мм/с, где  $U_\infty = 3,6$  мм/с при  $m_3 = \infty$ , и из измерений термопарами  $U_\phi^{tm} = 4$  мм/с. Для линейного пожара скорость движения фронта составляет 2,5–3 мм/с [12], т.е. скорость движения фронта пожара на первой и второй стадиях практически не зависит от типа источника пожара и определяется влажностью ЛГМ, скоростью ветра. На третьей стадии (затухание) движение фронта пожара прекращается.

### Температура и высота пламени

На рис. 3,а для линейного источника пожара и рис. 3,б для точечного приведено изменение в относительных единицах максимальной яркостной температуры  $T_m(t)$  и высоты пламени  $h(t)$  в мм от времени  $t$ . Кривые на рисунках – уравнения вида  $A + Bt^c$ , аппроксимирующие зависимость  $T_m(t)$  и  $h(t)$  от времени, полученные методом подбора. Линейный источник пожара (1-я стадия получена не в полном объеме):

$$T_m(t) = 160; \quad h(t) = 325 + 0,5 t \quad \text{при } t_1 < t < t_2 \quad \text{2-я стадия,} \quad (3)$$

$$T_m(t) = 160 - 0,47 (t - 0,9 t_2)^{1,24}; \quad h(t) = 325 - 7 (t - t_2) \quad \text{при } t > t_2 \approx 180 \text{ с} \quad \text{3-я стадия.} \quad (4)$$

Точечный источник пожара (2-я стадия получена не в полном объеме):

$$T_m(t) = 100 + 20 \sqrt{t}; \quad h(t) = 45 + 42,5 \sqrt{t} \quad \text{при } t < t_1 \approx 60 \text{ с} \quad \text{1-я стадия,} \quad (5)$$

$$T_m(t) = 240 - (t - t_2)^{1,24}; \quad h(t) = 280 - 13 (t - 0,9 t_2) \quad \text{при } t > t_2 \approx 75 \text{ с} \quad \text{3-я стадия,} \quad (6)$$

где  $t_2$  – время достижения фронтом пожара границы ЛГМ, определенное по изображениям пламени и по скорости движения фронта.

Высота пламени, рассчитанная по эмпирической формуле [1] для опада хвои ( $k = 9$ ), при линейном пожаре равна  $h = k\sqrt{m_3 U_\Phi} = 0,475$  м и несколько выше, чем полученная в данном эксперименте.

Из рис. 3 видно, что изменение температуры и высоты пламени на первой стадии загорания и установления процесса горения существенно зависят от типа источника зажигания. Если при линейном источнике температура и высота пламени быстро (5–15 с) и линейно растут со временем, то при точечном источнике они растут нелинейно, пропорционально  $t^{1/2}$  в течение  $\sim 50$  с.

На второй стадии высота пламени и максимальная температура стабилизируются. При линейном источнике пожара средняя высота пламени медленно растет со временем (по крайней мере при длине полосы  $\sim 0,7$  м), а средняя максимальная температура практически постоянная. При точечном источнике пожара вторая стадия наблюдалась в течение 15–20 с из-за недостаточной площади горения.

Третья стадия (затухание) не зависит от типа источника поджига. Высота пламени уменьшается пропорционально времени  $(t - t_2)$ , а максимальная температура пропорционально  $(t - t_2)^{1,24}$ . Однако затухание линейного пожара происходит медленнее. Постоянные  $A$  на этой стадии соответствуют максимальному среднему значению параметров  $T_m$ ,  $h_m$  на момент начала стадии.

### Площадь боковой поверхности пожара

На рис. 4 приведено изменение площади поверхности пламени  $S(t)$ , излучающей в направлении тепловизора (половину площади пламени), определенной по уровню  $\sim 0,1 T_m$ . Линии, аппроксимирующие зависимость от времени, получены методом подбора.

Для линейного источника пожара:

$$S(t) = 0,001 + 0,0006 t \quad \text{при } t < t_1 \approx 20 \text{ с} \quad \text{1-я стадия,} \quad (7)$$

$$S(t) = 0,013 + 0,000028 t \quad \text{при } t_1 < t < t_2 \approx 185 \text{ с} \quad \text{2-я стадия,} \quad (8)$$

$$S(t) = S_m \exp \left[ -\frac{t - t_2}{t_i} \right] = 0,018 \exp \left[ -\frac{t - 185}{22} \right] \quad \text{при } t > t_2 \approx 185 \text{ с} \quad \text{3-я стадия.} \quad (9)$$

Для точечного источника пожара:

$$S(t) = 0,5 \frac{\pi D(t)}{2} \sqrt{\left(\frac{D(t)}{2}\right)^2 + (h(t))^2} \quad \text{при } t < t_1 \approx 70 \text{ с} \quad \text{1-я стадия,} \quad (10)$$

$$S(t) = S_m \exp \left[ -\frac{t - t_2}{t_i} \right] = 0,09 \exp \left[ -\frac{t - 75}{22} \right] \quad \text{при } t > t_2 \approx 75 \text{ с} \quad \text{3-я стадия.} \quad (11)$$

Уравнение (10) описывает зависимость  $S(t)$  на стадиях загорания и формирования фронта горения от момента загорания до достижения им практически внешнего края ЛГМ (70–80-я с). Оно получено как половина площади боковой поверхности конуса (исходя из формы пламени), равной  $S(t) = A (\pi/2) R(t) L(t)$ , где  $A$  – постоянная (подбираемый коэффициент);  $R(t) = D(t)/2$  – радиус основания конуса;  $L(t) = \sqrt{\left(\frac{D(t)}{2}\right)^2 + (h(t))^2}$  – длина образующей конуса, причем зависимости  $D(t)$  и  $h(t)$  взяты по экспериментальным данным (см. уравнения (2), (5)). Уравнения (9), (11) описывают стадию затухания процесса горения в связи с прекращением движения фронта при достижении края ЛГМ и выгоранием остатков ЛГМ. Уравнение получено методом подбора, исходя из экспоненциального затухания процесса горения с параметрами  $S_m$  – максимальная средняя площадь поверхности пламени;  $t_i$  – постоянная, определяющая скорость затухания;  $t_2$  – время начала процесса затухания. Как видно из рисунков, эти уравнения достаточно хорошо описывают экспериментальные данные.

Вместо уравнения (10) для 1-й стадии пожара от точечного источника можно применить более простое выражение  $S(t) = 0,07 + (0,0028t)^{3/2}$ , хорошо описывающее экспериментальные результаты на стадии зажигания и формирования фронта.

### Полная энергия

На рис. 5,а для линейного источника и рис.5,б для точечного источника приведена зависимость величины, пропорциональной изменению полной энергии пламени  $P(t)$  в измеряемом спектральном интервале 3–5 мкм в каждом кадре за время 0,04 с, от времени. Линии, аппроксимирующие зависимость от времени, имеют следующий вид.

Для линейного источника пожара:

$$P(t) = 0,54 + 0,123 t \quad \text{при } t < t_1 \approx 20 \text{ с} \quad \text{1-я стадия,} \quad (12)$$

$$P(t) = 2,3 + 0,005 t \quad \text{при } t_1 < t < t_2 \approx 185 \text{ с} \quad \text{2-я стадия,} \quad (13)$$

$$P(t) = P_1 \exp \left[ -\frac{t-t_2}{t_i} \right] = 3 \exp \left[ -\frac{t-t_2}{20} \right] \quad \text{при } t > t_2 \approx 185 \text{ с} \quad \text{3-я стадия.} \quad (14)$$

Для точечного источника пожара:

$$\text{при } t < t_1 = 75 \text{ с} \quad \text{1-я стадия,}$$

$$P(t) = 1 + 1,3 T_i(t) S(t) = 1 + 1,3 (100 + 20\sqrt{t}) 0,5 \frac{\pi}{2} 10^{-6} \left( \frac{75 + 6,2 t}{2} \right) \sqrt{\left( \frac{73 + 6,2 t}{2} \right)^2 + (45 + 42,5\sqrt{t})^2}; \quad (15)$$

$$P(t) = 2,1 + 0,075 t + 0,55 (100 + 20\sqrt{t}) 0,5 \frac{\pi}{2} 10^{-6} \left( \frac{75 + 6,2 t}{2} \right) \sqrt{\left( \frac{73 + 6,2 t}{2} \right)^2 + (45 + 42,5\sqrt{t})^2}; \quad (16)$$

$$\text{при } t < t_2 = 75 \text{ с} \quad \text{3-я стадия,}$$

$$P(t) = 2,4 + 0,852 T_i(t) S(t) = 2,4 + 0,85 (240 - (t - t_2))^{1,24} 0,1 \exp \left[ -\frac{t-75}{17} \right]. \quad (17)$$

Уравнения (15) и (17) можно аппроксимировать более простыми соотношениями, хорошо описывающими экспериментальные результаты:

$$P(t) = P_1 + (0,11 t)^{3/2} \quad \text{при } t < t_1 = 75 \text{ с} \quad \text{1-я стадия,} \quad (18)$$

$$P(t) = P_1 \exp \left[ -\frac{t-t_2}{t_i} \right] = 25 \exp \left[ -\frac{t-t_2}{17} \right] \quad \text{при } t > t_2 = 75 \text{ с} \quad \text{3-я стадия.} \quad (19)$$

Уравнение (15) описывает зависимость  $P(t)$  на стадии загорания и формирования фронта горения от момента загорания до достижения им практически внешнего края ЛГМ (75–80-я с). Оно получено как произведение площади боковой поверхности конуса на этой стадии горения  $S(t)$  (10) на максимальную температуру  $T_m(t)$  (5). Постоянная составляющая 1 и множитель 1,3 получены методом подбора при наилучшем совпадении с экспериментальными данными. Более точно экспериментальные результаты на этой стадии горения представлены уравнением (16), в котором введен дополнительный член  $0,0075t$ , характеризующий зависимость изменения энергии на начальном этапе горения.

Уравнение (17) описывает стадию затухания процесса горения в связи с прекращением движения фронта при достижении края ЛГМ и выгоранием остатков ЛГМ. Уравнения получены так же, как произведение максимальной температуры  $T_m(t)$  на площадь поверхности пламени на этой стадии  $S(t)$ . Постоянные множители и составляющие получены методом подбора для наилучшего совпадения с экспериментальными данными.

Из рисунков и уравнений видно, что на первой стадии полная энергия пожара зависит от формы источника поджига. Если при линейном источнике полная энергия нарастает пропорционально времени, то при точечном источнике она возрастает пропорционально  $t^{3/2}$ . На второй стадии энергия медленно растет для линейного источника. Для точечного источника эта стадия только начинает формироваться с 60-й по 80-ю с. На стадии затухания полная энергия убывает по экспоненте для обоих источников.

## Анализ результатов

Совместный анализ полученных при обработке характеристик развития низового лесного пожара позволяет сделать следующие выводы.

1. Скорость распространения переднего (внешнего) фронта горения опада хвои при отсутствии ветра составляет  $U_{\phi} \approx 3,1$  мм/с во всех направлениях, близка к рассчитанной по известной формуле  $U_{\phi}^p = U_{\infty} [1 - \exp(-4m)] = 3$  мм/с и слабо зависит от формы источника пожара. Форма фронта пожара для точечного источника поджига близка к кругу диаметром  $D = U_{\phi} t$ .

2. На первой стадии (начало горения и формирование фронта пожара  $t < t_1$ ) происходит достаточно быстрое повышение максимальной температуры  $T_m(t)$ , высоты пламени  $h(t)$ , площади пламени  $S(t)$  и энергии  $P(t)$  в течение 10–15 с для линейного источника и 40–50 с для точечного. Причем скорость изменения этих параметров зависит от типа источника поджига.

Для линейного источника пожара характерна пропорциональная зависимость от времени, описываемая уравнением вида  $T_m(t), h(t), S(t), P(t) \sim A + Bt$ . Среднюю форму фронта горения можно представить в виде цилиндра в первые секунды горения, которая переходит затем в несимметричную гауссоиду с более крутым передним фронтом.

Для точечного источника характерны более медленное нелинейное нарастание максимальной температуры и высоты пламени ( $T(t), H(t) \sim A + Bt^{1/2}$ ) и более быстрый рост площади пламени и излучаемой энергии ( $S(t), P(t) \sim A + Bt^{3/2}$ ). При этом среднюю форму пламени можно представить в виде цилиндра, переходящего затем в форму, напоминающую конус или параболическую поверхность вращения. Физически такая форма пламени вполне объясняется процессами горения. При увеличении зоны горения приток воздуха, насыщенного кислородом, во внутреннюю область ограничен и процесс горения там замедляется, что должно привести к увеличению ширины фронта по сравнению с линейным пожаром. Кроме того, температура, а следовательно, и скорость подъема нагретого воздуха за счет сил плавучести в центре выше, чем на периферии. Это приводит к понижению давления в центральной области и стягиванию пламени в конус. Площадь поверхности пламени и выделяющаяся энергия быстро (нелинейно) растут со временем.

3. Вторая стадия – развитый процесс горения ( $t_1 < t < t_2$ ), который характеризуется относительной стабильностью характеристик процесса горения. Для точечного источника пожара эта стадия наступает тогда, когда в центральной области на достаточно большой площади выгорает ЛГМ. При этом давление в центральной области повышается, форма пламени переходит в горящее кольцо. На стадии горящего кольца высота пламени и ширина фронта горения должны совпадать с линейным пожаром. Однако для точечного источника площадь поверхности пламени будет расти пропорционально времени (радиусу фронта):  $S(t) \approx A 2\pi R(t) h(t) = A 2\pi U_{\phi} t h(t)$ , а полная энергия – нелинейно:  $P(t) \approx A 2\pi [R_{\text{н}}(t)^2 - R_{\text{в}}(t)^2] h(t)$ , где  $R_{\text{н}}(t), R_{\text{в}}(t)$  – внешний и внутренний радиусы фронта пожара. В нашем эксперименте мы наблюдали только начало этой стадии (55–75-я с), когда начали стабилизироваться максимальная температура и высота пламени (см. рис. 2,б), а площадь и энергия линейно росли со временем (см. рис. 3,б, 4,б).

4. Третья стадия – стадия затухания ( $t > t_2$ ), например за счет окончания ЛГМ, слабо зависит от формы источника пожара и характерна быстрым уменьшением максимальной температуры, высоты пламени, площади поверхности пламени и выделяющейся энергии. Причем высота пламени убывает пропорционально времени  $h(t) \approx h_m - B(t - t_2)$ , максимальная температура  $T_m(t) \approx T_m - B(t - t_2)^{1,24}$ , а площадь пламени и энергия спадают по экспоненте  $S(t) \approx S_m \exp\left(-\frac{t - t_2}{t_n}\right); P(t) \approx P_m \exp\left(-\frac{t - t_2}{t_n}\right)$ , где  $h_m, T_m, S_m, P_m$  – средние максимальные значения параметра к моменту начала затухания пожара;  $B, t_n$  – константы, определяющие скорость затухания, которые, по-видимому, должны зависеть от горючих свойств ЛГМ.

5. Все параметры процесса горения флуктуируют во времени с минимальной частотой  $\sim 0,07 \div 0,04$  Гц (15–25 с).

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96–01–00011)

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

2. Гришин А. М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во ТГУ, 1994. 218 с.



3. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 239 с.
4. Мирзоева Л.А., Камешков Г.Б., Лустберг Э.А., Маковцев Г.А., Захаренков В.Ф. Космическая оптико-электронная аппаратура обнаружения очагов лесных пожаров // Оптический журнал. 1992. N 8. С. 17–21.
5. Аксенов О.Ю., Антоненц А.И., Гушин С.И. Основные результаты экспериментов по обнаружению лесных пожаров с помощью высокоорбитальных космических аппаратов // Оптический журнал. 1992. N 8. С. 23–21.
6. Rothermell R. C. Airflow characteristics-wind tunnels and combustion facilities northern forest fire laboratory. Intermountain Forest and Range Experiment Station Forest Servis U.S. Department of Agriculture. Northern Forest Fire Laboratory Missoula. Montana, 1967.
7. Weise D. R. The Ups and Downs of Wall Shear-Stress // Proc. 12th Int. Conf. of Fire and Forest Meteorology. October 26–28, 1993, Jekyll Island, Georgia, 1993. P. 572–578.
8. Weise D. R. Modelling Wind and Slope-Induced Wildland Fire Behavior: Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. University of California at Berkeley, 1993. 130 p.
9. Гришин А.М., Зима В.П. Об экспериментальном исследовании низовых лесных пожаров в лабораторных условиях // Тезисы международного совещания-семинара «Сопряженные задачи физической механики и экология». Томск, 1994.
10. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов.радио, 1978. 300 с.
11. Доброткин А.А., Исаков А.В., Ильин А.Б., Петренко А.Г., Рейно В.В., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В. Блок регистрации и ввода информации с тепловизора в ЭВМ «Термик-2» // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 5. С. 673–679.
12. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П., Исаков А.В., Рейно В.В., Цвык Р.Ш. Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. N 6. С. 3–11.
13. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. М.: Гослесхоз, 1976. 110 с.

Томский государственный университет  
Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
4 июня 1997 г.

**A. M. Grishin, A. A. Dolgov, V. P. Zima, V. V. Reino, R. Sh. Tsvyk. Study of Evolution and Propagation of Ground Forest Fire by Means of IR Imager.**

The results of IR imaging technique application to study of dynamics of the luminance temperature field variation of the ground forest fires under laboratory conditions are treated in the paper. The linear and point origins of the firing are examined. The time-dependent characteristics (the velocity of the combustion front movement, flame size, total energy, etc.) of the luminance temperature field are analyzed. Empirical relationships describing the variation of these characteristics at different stages of the combustion are deduced.