

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ КРОН ДЕРЕВЬЕВ

А. М. Гришин, В. А. Перминов

Томский государственный университет, 634050 Томск

Представлены результаты численных расчетов перехода низового лесного пожара в верховой в отсутствие ветра, полученные с использованием общей математической модели лесных пожаров. Установлено, что зажигание полога леса носит газофазный характер. Определены критические условия перехода низового лесного пожара в верховой. Приведено сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Известны публикации по математическому моделированию перехода низового лесного пожара в верховой. Так, в работе [1] рассматривался прогрев полога леса с испарением влаги, но без учета пиролиза и зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ). При таком подходе невозможно определить, осуществится ли зажигание. Процесс пиролиза ЛГМ и зажигания его летучих горючих продуктов анализируется в работе [2]. Однако очаг низового лесного пожара моделировался зоной повышенной температуры, из которой выдувались инертные компоненты газовой фазы, что не отвечает действительности. На самом деле из очага низового лесного пожара в окружающую среду выделяются газообразные и дисперсные продукты пиролиза и горения ЛГМ. В данной работе более детально описано воздействие очага низового лесного пожара на полог леса.

Схема физической постановки задачи дана на рис. 1. В рамках этой схемы в приземном слое атмосферы рассматривается контрольный объем непрерывной сплошной многофазной реакционноспособной среды. Продукты пиролиза ЛГМ из напочвенного покрова поступают в пространство над ним, в дальнейшем они воспламеняются, и образуется факел пламени, который прогревает ЛГМ в пологе леса. Последние при нагревании выделяют летучие горючие продукты пиролиза, которые затем воспламеняются, что свидетельствует о переходе низового лесного пожара в верховой.

В данной работе используется общая математическая модель лесных пожаров [3], позволяющая учесть все описанные выше процессы. Очаг низового лесного пожара представляет собой источник тепла и массы в форме

круга, расположенный на напочвенном покрове. Температура очага задается функциональной зависимостью от времени и горизонтальной координаты  $r$ . Все остальные функции процесса определяются на основе законов сохранения массы и количества движения. Кроме того, предполагаем, что:

1) течение носит развитый турбулентный характер и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным,

2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука,

3) полог леса считается недеформируемой средой.

Полог леса моделируется однородной двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой [3]. В газодисперсной фазе присутствуют следующие компоненты:  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $C$  (частицы сажи), частицы золы. Известно [4], что газообразные горючие продукты пиролиза в основном состоят из оксида углерода. Поэтому можно считать кислород и оксид углерода компонентами, лимитирующими процесс тепловыделения. Предполагаем, что молекулярная масса газовой смеси совпадает с молекулярной массой воздуха, так как концентрация газообразных продуктов горения мала по сравнению с концентрациями азота, кислорода и оксида углерода. Эти допущения позволяют уменьшить количество уравнений. Кроме того, считаем, что давление в смеси газов мало отличается от атмосферного, и, следуя [3], предполагаем, что частицы сажи и дыма, взвешенные в газовой фазе, обладают той же скоростью, что и газ. Для описания переноса энергии излучением используем диффузионное приближение [3, 5]. Считаем, что скорость

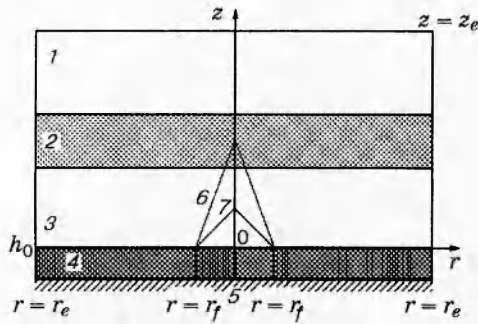


Рис. 1. Схема физической постановки задачи:

1 — пространство над пологом леса в приземном слое атмосферы; 2 — совокупность крон деревьев (полог леса); 3 — пространство между напочвенным покровом и пологом леса, в котором нет ЛГМ; 4 — напочвенный покров (опавшая хвоя, тонкие веточки, сухая и живая трава), 5 — почва; 6 — конвективная колонка; 7 — пламя очага низового пожара;  $r = r_f(t)$  — текущее положение фронта низового лесного пожара;  $r = r_e$  — боковая поверхность контрольного объема;  $z = z_e$  — верхняя граница контрольного объема;  $h_0$  — толщина напочвенного слоя ЛГМ

ветра в рассматриваемой области лесного массива значительно меньше скорости подъема нагретых газообразных продуктов пиролиза и горения, и поэтому влияние ветра на процесс зажигания пренебрежимо мало. Данное допущение позволяет рассматривать задачу в осесимметричной постановке.

Турбулентный конвективный перенос, обусловленный действием силы тяжести, описывается с использованием уравнений Рейнольдса для многофазной реакционноспособной среды [3]. Эта задача в цилиндрической системе координат сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = Q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v w) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (-r^n \rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{v'w'}) - \rho s c_d v \sqrt{v^2 + w^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho w) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho v w) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w^2) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (-r^n \rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'^2}) - \rho s c_d w \sqrt{v^2 + w^2} - \rho g, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_p T) = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (-r^n \rho c_p \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho c_p \overline{w'T'}) + k_g (c U_R - 4\sigma T^4) + q_1 R_1 + \alpha_v (T_s - T) + (c_p)_4 (T_s - T) R_{s,2} + (c_p)_s (T_s - T) (1 - \alpha) R_{s,1} + c_p (T_s - T) Q, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_\alpha) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho v c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w c_\alpha) = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (-r^n \rho \overline{v'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'c'_\alpha}) - R_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, 3, 4, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r^n c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - (k_g + k_s) c U_R + 4\sigma (k_g T^4 + k_s T_s^4) = 0, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i (c_p)_i \varphi_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_3 R_{s,3} - q_2 R_{s,2} + k_s (c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s), \quad (7)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{s,1}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{s,2}, \quad (8)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c \tilde{n}_{s,1} - \frac{M_c}{M_1} \tilde{n}_{s,3} - \alpha_{s,4} \tilde{n}_{s,3} - \tilde{K}_3^{(s)}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_{s,4} R_{s,3} - R_4^{(s)}, \quad (9)$$

$$p_e = p_s = \frac{\rho_s R T}{M}, \quad Q = (1 - \alpha_c) R_{s,1} + R_{s,2} + \frac{M_c}{M_1} R_{s,3} + R_3^{(s)} + R_4^{(s)}, \quad R_1 = -R_{s,3} - \frac{M_1}{2M_2} R_{r,2}, \quad (10)$$

$$R_2 = \nu (1 - \alpha_c) R_{s,1} - R_{r,2}, \quad R_3^{(s)} = \alpha_3^{(s)} R_{s,1}, \quad R_{r,2} = M_2 k_{0,s} \left( \frac{c_1 M}{M_1} \right)^{0,25} \left( \frac{c_2 M}{M_2} \right) T^{-2,25} \exp \left( -\frac{E}{RT} \right),$$

$$R_4^{(s)} = \frac{\alpha_{s,4} w}{w + w_*} R_{s,3}, \quad R_{s,3} = k_{s,3} \varphi_3 s_\sigma \rho c_1 \exp \left( -\frac{E_{s,3}}{RT_s} \right).$$

Система уравнений (1)–(10) решается с учетом следующих начальных и граничных условий:

$$t = 0: \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{\alpha,e}, \quad T_s = T_e, \quad \varphi_i = \varphi_{i,e}; \quad (11)$$

$$r = 0: \quad v = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial U_R}{\partial r} = 0;$$

$$r = r_e: \quad \frac{\partial v}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial r} + \frac{c}{2} U_R = 0;$$

$$z = 0: \quad v = 0, \quad \rho w = h_0 Q, \quad (14)$$

$$-\rho D_T \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} + \rho w c_\alpha = h_0 R_\alpha,$$

$$Q = \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} Q dz, \quad R_\alpha = \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} R_\alpha dz,$$

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{1}{\sqrt{3}} (4\sigma T_s^4 f - c U_R) \Big|_{z=0}, \quad (15)$$

$$f = 1 - \exp(-k_0 h_0 \sqrt{3}),$$

$$T_{s,0} = T \Big|_{z=0} =$$

$$= \begin{cases} T_e + (T_0 - T_e) \frac{t}{t_0} \exp\left\{-\left[\frac{r}{\Delta}\right]^2\right\}, & t \leq t_0, \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp\left\{-\left[\frac{r - r_f}{\Delta}\right]^2\right\}, & t > t_0, \end{cases}$$

$$r_f = (t - t_0)\omega, \quad (16)$$

$$z = z_s: \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 0.$$

В формулах (1)–(17)  $r$  и  $z$  — координаты ( $z$  отсчитывается от верхней границы напочвенного покрова, а  $r$  — от оси симметрии);  $n = 1$  для осесимметричного случая;  $t$  — текущее время;  $t_0$  — время формирования очага низового пожара;  $\omega$  — скорость нормального распространения фронта низового лесного пожара;  $R_{s,1}, R_{s,2}, R_{s,3}$  — массовые скорости пиролиза, сушки ЛГМ и горения коксика;  $\bar{R}_1, R_2$  — массовые скорости изменения  $O_2$  и  $CO$ ;  $R_{r,2}$  — массовая скорость горения летучих продуктов пиролиза;  $R_3^{(s)}, R_4^{(s)}$  — массовые скорости образования сажи и дыма в газодисперсной фазе;  $c_p$  — удельная теплоемкость воздуха;  $(c_p)_i, \rho_i, \varphi_i$  — удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля  $i$ -й фазы (1 — сухое органическое вещество, 2 — вода в жидко-капельном связанном с органическим веществом состоянии, 3 — конденсированные продукты пиролиза (кокстик), 4 — минеральная часть (зола), 5 —

газовая фаза);  $T, T_s$  — температуры газовой и конденсированной фаз;  $c_\alpha$  — массовые концентрации ( $\alpha = 1$  — кислород, 2 — оксид углерода, 3 — частицы сажи, 4 — частицы дыма);  $\rho_r$  — плотность газовой фазы;  $p$  — давление,  $p_r$  — давление газовой фазы;  $U_R$  — плотность энергии излучения;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $k$  — коэффициент ослабления излучения;  $k_0$  — начальный коэффициент поглощения;  $k_g, k_s$  — коэффициенты поглощения газодисперсной и конденсированной фаз;  $\alpha_v$  — коэффициент обмена фаз;  $q_{s,i}, E_{s,i}, k_{s,i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) и  $q_1, E_1, k_1$  — тепловой эффект, энергия активации и предэкспонент реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих газообразных продуктов пиролиза;  $M_\alpha, M_c, M$  — молекулярные массы индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и смеси газов;  $s, c_d$  — удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полого леса;  $c$  — скорость света;  $v, w$  — проекции скорости на оси  $r$  и  $z$ ;  $\alpha_c, \nu$  — коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза;  $Q$  — массовая скорость образования газодисперсной фазы;  $w_*$  — характерная скорость выдува из очага низового лесного пожара;  $\alpha_3, \alpha_4$  — эмпирические константы;  $g$  — ускорение свободного падения;  $T_0$  — максимальная температура, а  $\Delta$  и  $\omega$  — ширина и скорость нормального распространения фронта в очаге низового лесного пожара;  $D_T$  — коэффициент турбулентной диффузии;  $h_0$  — толщина напочвенного покрова. Индексы нуль и «е» относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно, а  $w$  — к значениям искомым функций при  $z = 0$ . Параметры со штрихом — пульсационные составляющие данной величины.

Система уравнений (1)–(17) описывает процессы переноса в области лесного массива. Термокинетические, термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют ЛГМ соснового леса [1, 2]:  $E_{s,1}/R = 9400$  К,  $k_{s,1} = 3,36 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>,  $q_{s,1} = 0$ ,  $E_{s,2}/R = 6000$  К,  $k_{s,2} = 6 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>,  $q_{s,2} = 3 \cdot 10^6$  Дж/кг,  $E_{s,3}/R = 10^4$  К,  $k_{s,3} = 10^3$  с<sup>-1</sup>,  $q_{s,3} = 1,2 \cdot 10^7$  Дж/кг,  $E_1/R = 11500$  К,  $k_1 = 3 \cdot 10^{13}$ ,  $q_1 = 10^7$  Дж/кг,  $(c_p)_{s,1} = 2000$  Дж/(кг · К),  $(c_p)_{s,2} = 4180$  Дж/(кг · К),  $(c_p)_{s,3} = 900$  Дж/(кг · К),  $(c_p)_{s,4} = 1000$  Дж/(кг · К),  $c_p = 1000$  Дж/(кг · К),  $s = 1000$  м<sup>-1</sup>,  $sc_d = 0,1$ ,  $\alpha_c = 0,06$ ,  $\rho_4 \varphi_4 = 0,08$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0,7$ ,  $\rho_1 = 500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_3 = 200$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_e = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>,

$c_{e,1} = 0,23$ ,  $c_{e,2} = 0$ ,  $\varphi_{e,3} = 0$ ,  $p_e = 10^5$  Н/м<sup>2</sup>,  $T_e = 300$  К; коэффициент образования сажи в газодисперсной фазе  $\alpha_3^{(s)} = 10^{-4}$ , дыма —  $\alpha_4^{(s)} = 0,66$ ; теплоемкость смеси газов в газовой фазе принималась равной теплоемкости воздуха. Для полога леса было принято, что влагосодержание  $W = 0,666$ , плотность слоя  $\rho_{сл} = 0,5$  кг/м<sup>3</sup>, зольность  $\zeta = 0,04$ . Начальные объемные доли фаз можно определить с помощью этих значений по формулам из [4].

В уравнении сохранения энергии для газодисперсной фазы  $(c_p)_4(T_s - T)R_{s,2}$  и  $(c_p)_s(T_s - T)(1 - \alpha_c)R_{s,1}$  характеризуют приток тепла из твердой фазы в газовую в результате испарения и пиролиза ЛГМ, где  $(c_p)_4$  — теплоемкость паров воды, а  $(c_p)_s$  — теплоемкость смеси пиролитических газов. При проведении расчетов использовали так называемое двухкомпонентное приближение [4], в рамках которого определяли только концентрации кислорода и оксида углерода, а также массовые концентрации сажи и частиц дыма, сильно влияющие на перенос энергии излучением.

Граничные условия (15) для плотности энергии излучения получены в результате допущения о независимости температуры слоя напочвенного покрова от его толщины и точного решения сопряженной задачи переноса излучения в изотермическом слое. Граничное условие на нижней границе расчетной области для уравнения переноса излучения задано с помощью Р<sub>1</sub>-приближения метода сферических гармоник [5]. В окончательном виде оно имеет следующий вид:

$$z = 0: -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} = \frac{\varepsilon}{2(2 - \varepsilon)} (4\sigma T_{S,w}^4 - cU_{R,w}), \quad (18)$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты напочвенного покрова, а  $T_{S,w}$  и  $U_{R,w}$  — температура и плотность энергии излучения на верхней границе напочвенного покрова. В выражение для  $U_R$  в (15) не входит  $\varepsilon$ . Оптические характеристики напочвенного покрова определяются значениями  $h_0$  и  $k_0$ . Очевидно, что значения потоков излучения, определяемые в условиях (15) и (18), должны совпадать. Приравнивая соотношения (15), (18), получаем выражение для интегральной степени черноты слоя [3]:

$$\varepsilon = \frac{4(4\sigma T_{S,w}^4 f - cU_{R,w})}{\sqrt{3(4\sigma T_{S,w}^4 - cU_{R,w}) + 2(4\sigma T_{S,w}^4 f - cU_{R,w})}}. \quad (19)$$

Из анализа этой формулы следует, что  $\varepsilon$  не является постоянной величиной, а представляет собой функцию времени и координаты  $r$ , так как  $T_{S,w} = T_{S,w}(t, r)$  и  $U_{R,w} = U_{R,w}(t, r)$ .

Надо отметить, что в слое ЛГМ при  $-h_0 \leq z \leq 0$  средние температуры газовой и конденсированной фаз для простоты принимаются одинаковыми и определяются по формуле (16). Поэтому средние объемные доли фаз и концентраций компонентов газовой фазы в почвенном покрове, которые необходимы для определения  $Q$ ,  $U_{R,w}$ ,  $c_{\alpha,w}$ , легко определяются в квадратурах из упрощенных уравнений сохранения массы компонентов и объемных долей при осреднении уравнений (5), (8), (9) по переменной  $z$ , при этом  $T$  и  $T_s$  определяются по формуле (16). Значение  $U_R$  находится из приближенного уравнения, которое получается из (8) при отбрасывании первого члена. Для напочвенного покрова было принято, что  $W = 0,1$ ,  $\rho_{сл} = 20$  кг/м<sup>3</sup>,  $\zeta = 0,04$ . Кроме того, во всех расчетах величины  $T_s$  по формуле (16) использованы следующие значения параметров:  $t_0 = 2$  с,  $h_0 = 0,05$  м,  $\omega = 0,01$  м/с,  $\Delta = 0,3$  м. Размер расчетной области в целом  $r_e = 5$  м,  $z_e = 5$  м.

Компоненты тензора турбулентных напряжений, турбулентные потоки тепла и массы в системе (1)–(17) записываются через градиенты среднего течения:

$$\begin{aligned} -\overline{\rho u_i' u_j'} &= \mu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij}, \\ -\overline{\rho u_j' c_p T'} &= \lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad -\overline{\rho u_j' c'_\alpha} = \rho D_T \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (20)$$

$\lambda_T = \mu_T c_p / Pr_T$ ,  $\rho D_T = \mu_T / Sc_T$ ,  $\mu_T = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon$ , где  $\mu_T$ ,  $\lambda_T$ ,  $D_T$  — коэффициенты турбулентных вязкости, теплопроводности и диффузии соответственно;  $Pr_T$ ,  $Sc_T$  — турбулентные числа Прандтля и Шмидта, полагаются равными единице. Для определения  $\mu_T$  использовали локально-равновесную модель турбулентности [3]:

$$\begin{aligned} \mu_T &= \rho \left( \frac{c_\mu}{c_1} \right)^{3/2} l^2 \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \right. \\ &+ \left. \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[ \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right]^2 - \frac{g}{TP_{T_1}} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\}^{1/2}, \\ l &= zk_T / (1 + 2,5z\sqrt{sc_d/h}), \end{aligned} \quad (21)$$

где константы равны  $k_T = 0,4$ ,  $c_1 = 1,44$ ,  $c_\mu = 0,09$ ,  $h = h_4 - h_5$  ( $h_4$ ,  $h_5$  — высоты нижней и верхней границ полога леса на рис. 1).

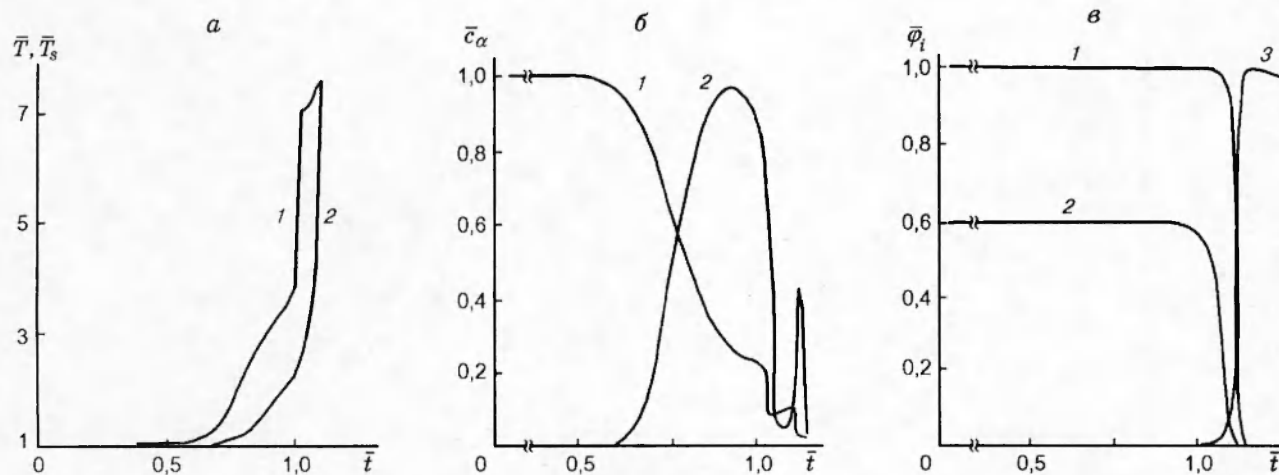


Рис. 2. Распределения безразмерных температур, концентраций и объемных долей фаз на нижней границе полога леса при  $r = 0$  в зависимости от безразмерного времени  $t = t/t_0$ :

а: 1 —  $T = T/T_e$ , 2 —  $\bar{T}_s = T_s/T_e$ ,  $T_e = 300$  К, б: 1 —  $c_1$ , 2 —  $c_2$ ,  $c_\alpha = c_\alpha/c_{e,1}$ , в: 1 —  $\varphi_1 = \varphi_1/\varphi_{e,1}$ , 2 —  $\varphi_2 = \rho_2\varphi_2/\rho_c$ , 3 —  $\varphi_3 = \rho_3\varphi_3/\alpha_c\rho_1\varphi_{e,1}$

Оптические характеристики среды в пологе леса и напочвенном покрове определяли по формулам [4]

$$k_s = \alpha_s \varphi_s / d_s, \quad \beta_s = \rho_s \varphi_s / d_s, \quad (22)$$

где  $\varphi_s$  — объемная доля ЛГМ,  $d_s$  — диаметр типичных элементов ЛГМ, которые равномерно ориентированы по всем направлениям и имеют вид цилиндров длиной  $l_s$ , значительно превышающей  $d_s$ ;  $\alpha_s, \rho_s$  — коэффициенты поглощения и отражения для одного элемента ЛГМ.

Коэффициенты поглощения и рассеяния для дисперсных частиц сажи и золы имеют вид [4]

$$k^{(s)} = \frac{\alpha_3}{a_3} \varphi_3 + \frac{\alpha_4}{a_4} \varphi_4, \quad \beta^{(s)} = \frac{\rho_3}{a_3} \varphi_3 + \frac{\rho_4}{a_4} \varphi_4. \quad (23)$$

Здесь  $\alpha_3, \alpha_4; \rho_3, \rho_4$  и  $d_3, d_4$  — коэффициенты поглощения, отражения и диаметры типичных сферических частиц сажи и золы (дыма), а  $\varphi_3, \varphi_4$  — объемные доли частиц сажи и золы (дыма).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

На основе изложенной выше математической постановки (1)–(17) проведены численные расчеты. В окрестности очага тепло- и массовыделения происходит всплытие нагретых масс воздуха, продуктов пиролиза и горения. В результате притока воздуха с периферии над

очагом низового пожара образуется тороидальный вихрь, благодаря которому осуществляется тепло- и массообмен конвективной колонки с внешней средой. Максимальный прогрев полога леса реализуется вблизи оси симметрии. На рис. 2 представлено изменение с течением времени температур газовой и твердой фаз, массовых концентраций кислорода и горючих продуктов пиролиза и объемных долей фаз на нижней границе полога леса на оси симметрии. Из рисунков видно, что с ростом температуры  $T_{s,0}$  в очаге низового лесного пожара полог леса прогревается в основном за счет конвективного теплообмена. Как показали расчеты для рассматриваемой задачи, в течение всего процесса температура газовой фазы выше температуры твердой фазы (см. рис. 2,а). Это объясняется тем, что горение носит газофазный характер, т. е. в первую очередь нагреваются газообразные продукты горения. Механизм процесса перехода низового пожара в верховой состоит в следующем.

1. Газообразные продукты пиролиза, выделившиеся из напочвенного покрова, воспламеняются в пространстве между пологом леса и напочвенным покровом (приблизительно в момент времени 2,1 с), и возникает факел пламени над очагом лесного пожара. При этом факел пламени низового пожара касается нижней границы полога леса. Из анализа кривых рис. 2 следует, что в этот момент времени происходит уменьшение концентрации кисло-

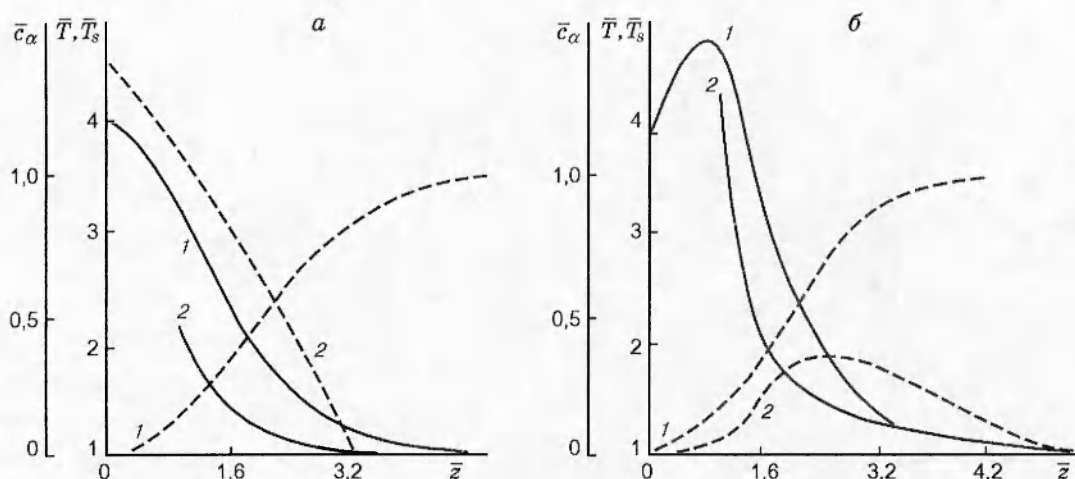


Рис. 3. Распределения безразмерных температур газовой (сплошная кривая 1) и твердой (сплошная кривая 2) фаз и безразмерных концентраций кислорода и оксида углерода (штриховые кривые 1 и 2 соответственно) на оси симметрии в зависимости от  $z$  ( $z = z/h_1$ ):

$t = 2,0$  (а) и  $2,4$  с (б)

рода и газообразных продуктов пиролиза (см. рис. 2, б), а также рост температуры обеих фаз (см. рис. 2, а), но при этом  $T > T_s$ . Это объясняется тем, что горение носит газофазный характер, т. е. в первую очередь сгорают газообразные горючие продукты пиролиза и нагреваются газообразные продукты горения.

2. Как следует из анализа рис. 2, б, в, при прогреве полога леса испаряется влага, выделяются газообразные продукты пиролиза. Далее в момент времени  $t \approx 2,4$  с происходит их воспламенение в пологе леса, что означает переход низового лесного пожара в верховой.

На рис. 3, а, б представлены распределения безразмерных температур  $\bar{T}$  и  $\bar{T}_s$  и массовых концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза на оси симметрии в различные моменты времени. Из анализа кривых видно, что при задании температуры в очаге низового лесного пожара согласно формуле (16) в момент времени  $t \approx 2$  с происходит выдув летучих горючих продуктов пиролиза из напочвенного покрова. Их максимальное количество достигается на нижней границе полога леса (см. рис. 3, а, б). Затем в пространстве между пологом леса и напочвенным покровом они воспламеняются. Во время всего этого процесса происходит прогрев ЛГМ полога леса, из них испаряются влага и летучие горючие продукты пиролиза. В результате в газовой фазе образуется смесь горючего газа с окислителем, которая в момент времени  $t = t_*$  (в данном слу-

чае  $t_* = 2,4$  с) воспламеняется. После этого горение распространяется по пологу леса. В момент зажигания, которое происходит в газовой фазе в окрестности нижней границы полога леса, температуры газовой и твердой фаз быстро растут. Поэтому для определения времени зажигания использовалось равенство

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right|_{t=t_*, z=h_1} = 0. \quad (24)$$

Нами было изучено также влияние параметров очага низового лесного пожара на воспламенение полога леса. Была проведена серия расчетов критического расстояния от напочвенного покрова до нижней границы полога леса ( $z_*$ ) и критической энергии зажигания ( $Q_1$ ) для различных значений толщины напочвенного покрова  $h_0$  ( $0,01 \leq h_0 \leq 0,05$  м). Из рис. 4, а видно, что с ростом  $h_0$  расстояние  $z_*$ , на котором происходит воспламенение кроны, увеличивается. Это объясняется тем, что для создания очага низового лесного пожара, способного зажечь полог леса, необходимо достаточное количество ЛГМ в напочвенном покрове. С ростом высоты слоя ЛГМ увеличивается количество энергии, которое выделяется с единицы поверхности очага низового лесного пожара, а затем поступает на нижнюю границу полога леса. Следовательно, критическое расстояние до полога леса, на котором возможно воспламенение кроны деревьев, также должно увеличиваться. При этом возрастает и количе-



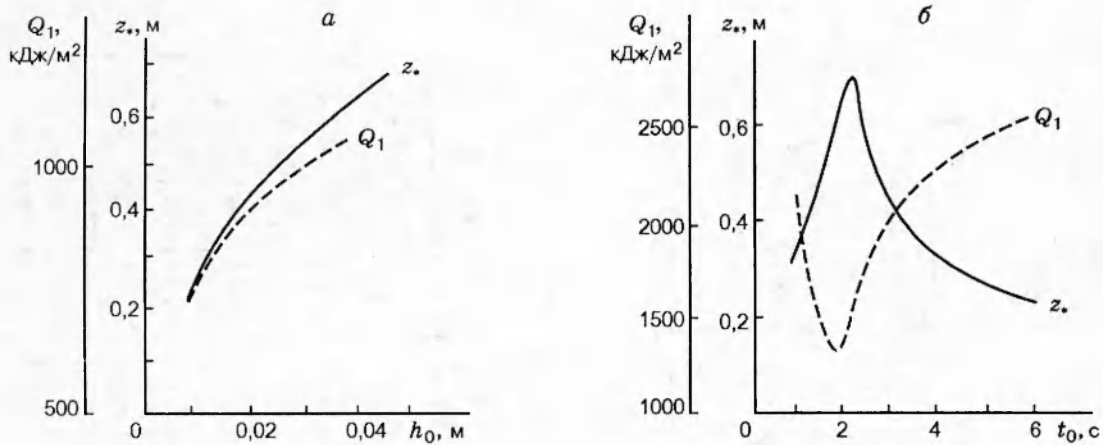


Рис. 4. Зависимости критической энергии зажигания  $Q_1$  и критического расстояния до нижней границы полога леса  $z_*$  от толщины напочвенного покрова (а) и времени формирования очага низового лесного пожара (б)

ство энергии  $Q_1$ , которое необходимо подвести на нижнюю границу полога леса для зажигания (см. рис. 4,а). Из формулы (16) следует, что изменение температуры в напочвенном покрове зависит от времени формирования очага низового лесного пожара  $t_0$ . На основе численных расчетов установлено критическое значение  $t_0 = t_{кр}$ , при котором происходит воспламенение полога леса на максимальном расстоянии от напочвенного покрова. При этом на переход низового лесного пожара в верховой затрачивается минимальное количество энергии (рис. 4,б). Указанная ситуация реализуется, поскольку при  $t_0 < t_{кр}$  температура напочвенного покрова быстро растет. Это вызывает быстрое выделение из него летучих горючих продуктов пиролиза, которые рассеиваются в пологе леса, а выдув летучих из очага низового лесного пожара почти прекращается. Сокращение времени формирования очага низового лесного пожара уменьшает время его воздействия на полог леса. Следовательно, прогрев последнего с последующими процессами испарения влаги, пиролиза ЛГМ и воспламенения возможен лишь при уменьшении расстояния от напочвенного покрова. При  $t_0 > t_{кр}$  действие очага низового лесного пожара растягивается во времени, что также вызывает уменьшение расстояния от напочвенного покрова до полога леса, на котором возможен переход низового лесного пожара в верховой. При этом увеличивается количество энергии на единицу поверхности, которое необходимо подвести в полог леса (рис. 4,б). При дальнейшем увеличении

времени формирования очага пожара происходит разложение ЛГМ в напочвенном покрове без воспламенения летучих продуктов пиролиза, что напоминает процесс тления.

Для полного представления об особенностях тепло- и массообмена полога леса с газообразными продуктами горения низового лесного пожара представляют интерес изотермы газовой и конденсированной фаз (рис. 5, I, II), линии равных уровней концентраций окислителя и летучих продуктов пиролиза (рис. 5, III, IV), а также векторные поля скоростей (рис. 6). В результате анализа численных данных, представленных на рис. 5, 6, можно утверждать, что стадия прогрева характерна тем, что включает в себя образование термика — нагретых газообразных продуктов пиролиза и горения ЛГМ в очаге низового лесного пожара, всплывающих в атмосфере. Эта стадия завершается воспламенением газовой фазы в промежутке между пологом леса и напочвенным покровом (см. рис. 2). При этом существенную роль в тепло- и массопереносе играет подсос воздуха из окружающей среды. При вовлечении воздуха с периферии наблюдаются немонотонная зависимость  $T(0, z)$  и грибовидная форма изотерм и линий равных уровней концентраций компонентов газовой фазы. Тороидальный вихрь вследствие действия массовых сил удаляется от оси симметрии и поднимается вверх (см. рис. 6).

На рис. 7 представлены результаты расчетов изменения величины  $\epsilon$  с течением времени для различных запасов ЛГМ в напочвенном по-

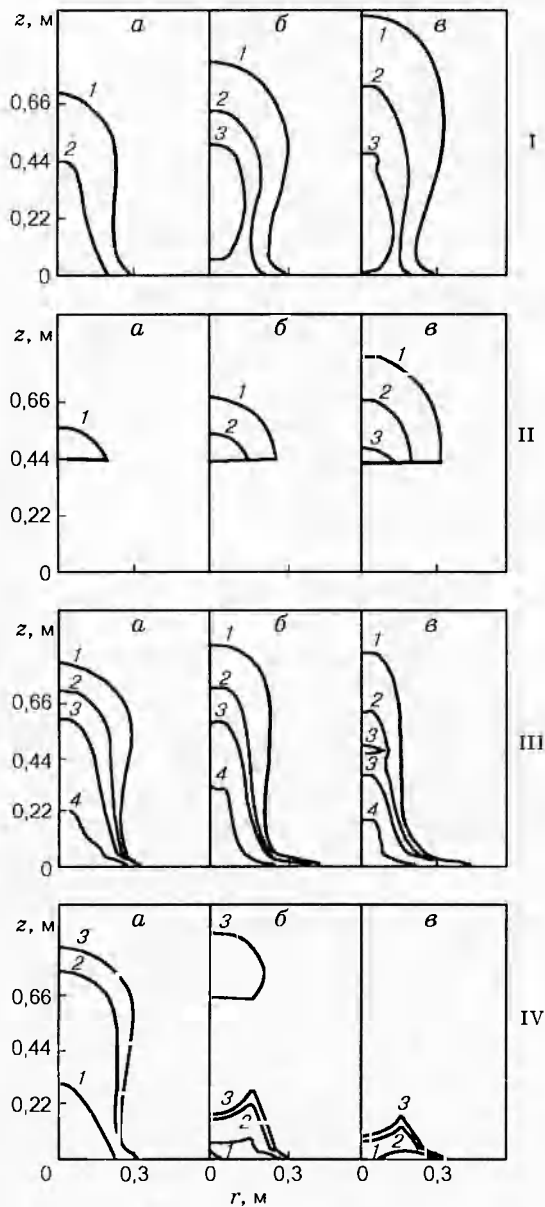


Рис. 5. Изолинии искомых функций в процессе прогрева и при зажигании ( $W = 110\%$ ,  $h_0 = 0,05$  м,  $h_1 = 0,44$  м) в моменты времени  $t = 2,0$  (а),  $2,2$  (б),  $2,4$  с (в):

1 — изотермы в газовой фазе над слоем ЛГМ:  $T = T/T_e = 2$  (1), 3 (2), 5 (3); II — изотермы в конденсированной фазе полога леса:  $\bar{T}_s = T_s/T_{s,e} = 1,5$  (1), 2 (2), 3 (3); III — линии равных концентраций хлора:  $c_1 = 0,6$  (1),  $0,5$  (2),  $0,4$  (3) и  $0,1$  (4); IV — линии равных относительных концентраций оксида углерода:  $c_2 = 1,0$  (1),  $0,5$  (2),  $0,4$  (3)

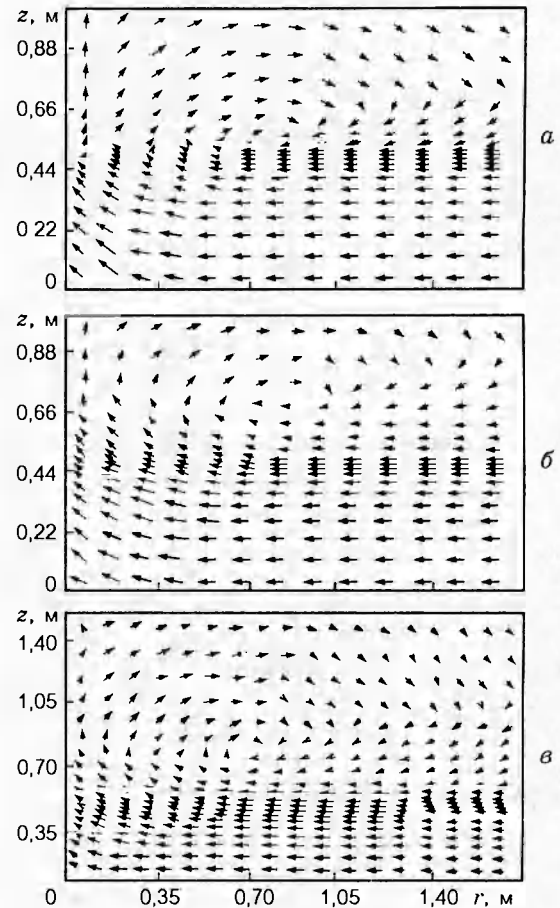


Рис. 6. Векторные поля скорости в моменты времени  $t = 2,0$  (а),  $2,2$  (б),  $2,4$  с (в)

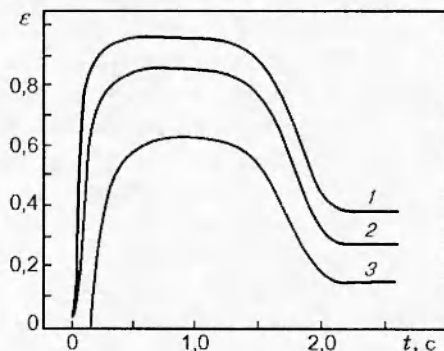


Рис. 7. Изменение степени черноты напочвенного покрова при  $r = 0$  с течением времени при температуре горения  $1300$  К для запасов ЛГМ, равных  $0,2$  (1),  $0,6$  (2);  $1$  кг/м<sup>2</sup> (3)



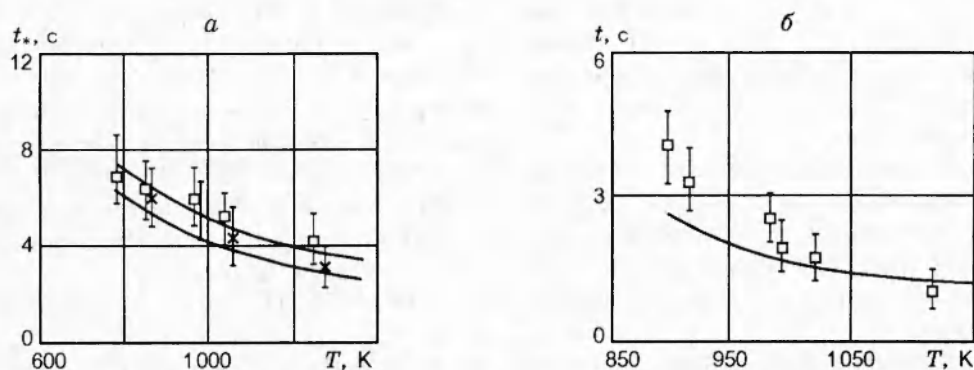


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных [6, 7] времён зажигания влажной (а) и сухой (б) хвои:

а —  $W = 110\%$ ;  $w = 1$  м/с: кривая 1 — расчет, квадраты — эксперимент,  $w = 2$  м/с: кривая 2 — расчет, крестики — эксперимент (данные [7]); б —  $w = 1$  м/с: линия — расчет, точки — эксперимент (данные [6, 7])

крове. С увеличением запаса ЛГМ значение  $\epsilon$  выше во всё время прогрева и зажигания полога леса. Видно, что вначале значение  $\epsilon$  возрастает почти до 1, а затем падает практически до 0,2. Это свидетельствует о том, что  $\epsilon$  является функцией процесса горения слоя ЛГМ и в условии (19) требуется, вообще говоря, использовать функциональную зависимость  $\epsilon(t)$ . При использовании граничного условия (15) нет необходимости задавать эту величину.

Проверка справедливости принятой в работе математической модели и проведенных численных расчетов по воспламенению полога леса устанавливалась сравнением с экспериментальными данными зажигания хвоинок сосны в высокотемпературном воздушном потоке, которые были получены в [6, 7]. В расчетах, как и в эксперименте, задавался выдув из напочвенного покрова инертной газовой смеси. На рис. 8 изображены расчетные зависимости времён зажигания влажной и сухой хвои. Из анализа результатов численных расчетов и экспериментальных исследований следует, что при скорости выдува  $w = 2$  м/с зажигание влажной хвои происходит быстрее, чем при  $w = 1$  м/с. Для сухой хвои при численных расчетах в пологе леса воспламенение совокупности хвоинок происходит несколько быстрее, чем отдельных хвоинок в экспериментальных исследованиях. Этот результат согласуется с экспериментальными наблюдениями. Так, в [7] отмечается, что процессы прогрева, сушки и пиролиза как отдельной хвоинки, так и их совокупности сопоставимы в силу достаточно большого расстояния между хвоинками по сравнению с толщиной теплового пограничного слоя

на элементе ЛГМ. Однако для совокупности хвоинок перед моментом воспламенения в пологе леса образуется большее количество горючих продуктов пиролиза. Их вынос с нижней границы полога леса тормозится сопротивлением элементов ЛГМ. Совпадение опытных и расчетных данных при температуре воздуха выше 900 К следует считать вполне удовлетворительным, подтверждающим адекватность представленной в работе математической модели.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов численного решения задачи перехода низового лесного пожара в верховой показал, что имеют место следующие стадии этого процесса: прогрев напочвенного покрова и полога леса, образование газообразных продуктов пиролиза напочвенного покрова и их воспламенение, образование газообразных продуктов полога леса и их зажигание.

2. В результате решения задачи радиационно-конвективного теплообмена получено, что степень черноты напочвенного покрова, определяемая выражением (19), не является заранее известной функцией времени и радиальной координаты  $r$  и изменяется в пределах  $0 < \epsilon < 1$ . Поэтому целесообразно использовать сопряженную постановку задачи для математического описания (система (1)–(17)) перехода низового лесного пожара в верховой.

3. Установлено, что при воздействии очага низового лесного пожара на полог соснового древостоя характеристики его зажигания (критическая энергия зажигания  $Q_1$  и критическое расстояние от напочвенного покрова до полога

леса  $z_*$ ) немонотонно зависят от времени формирования очага низового пожара  $t_0$ . Показано, что существует критическое значение времени  $t_0$ , для которого  $Q_1$  имеет минимальное, а  $z_*$  — максимальное значения.

4. Результаты теоретических исследований удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [6, 7], что подтверждает адекватность предложенной в работе математической модели перехода низового лесного пожара в верховой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-00011).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Фомин А. А.** Структура течения и прогрев окружающей среды над локальным очагом лесного пожара: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1989.
2. **Гришин А. М., Перминов В. А.** Переход низового лесного пожара в верховой // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 27–35.
3. **Гришин А. М.** Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 5. С. 34–54.
4. **Гришин А. М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
5. **Оцисик М. Н.** Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976.
6. **Исаков Р. В.** Воспламенение хвои при развитии низовых пожаров в верховые: Дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: Институт леса и древесины СО АН СССР, 1985.
7. **Леонтьев А. К., Моршин В. Н.** Метод расчета воспламенения тонкой растительной частицы в конвективном потоке газа / Интенсификация лесозаготовительных и лесохозяйственных производств. Ленинград: Лесотехн. академия, 1989. С. 59–67.

*Поступила в редакцию 8/X 1995 г.,  
в окончательном варианте — 18/III 1998 г.*