

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕРШИННЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ОДНОРОДНЫХ ЛЕСНЫХ МАССИВАХ И ВДОЛЬ ПРОСЕК

А. М. Гришин, О. В. Шипулина

Томский государственный университет, 634050 Томск, fire@fire.tsu.tomsk.su

Даны математическая постановка и численное решение задачи о распространении вершинных верховых пожаров в однородных лесных массивах и в окрестности различных просек (дороги, трассы, линии электропередач), возле которых чаще всего возникают пожары.

Ключевые слова: математическое моделирование, фронт вершинного верхового лесного пожара, предвестники фронта.

Проблема защиты лесов от лесных пожаров приобретает с каждым днем все большую значимость. На практике лесные пожары часто возникают вдоль просек, созданных при строительстве автомобильных и железных дорог, линий электропередач. Это объясняется тем, что антропогенная нагрузка в районе этих просек больше, чем в обычных лесах.

Наиболее распространенными и опасными являются интенсивные вершинные лесные пожары вследствие большой скорости их распространения. В связи с тем, что экспериментальные методы исследования интенсивных лесных пожаров слишком дороги и трудоемки, а полное физическое моделирование этого явления в лабораторных условиях невозможно, в данной работе использован метод математического моделирования [1]. Установлено, что во фронте вершинного верхового пожара на температуру горения значительное влияние оказывает вдув паров воды и продуктов пиролиза из элементов лесных горючих материалов (ЛГМ), а впереди основного фронта, распространяющегося по пологу, над просекой возникает волна горения газообразных продуктов пиролиза — предвестник фронта пожара в лесном массиве.

## 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в бесконечном однородном лесном массиве расположен очаг повышенной темпера-

туры, инициирующий лесной пожар. Тип лесного пожара определяется как вершинный верховой, когда огнем охвачен только полог леса [1]. Ось  $x$  связана с направлением ветра, ось  $y$  направлена перпендикулярно направлению ветра в горизонтальной плоскости, ось  $z$  — вертикально вверх. Начало координат расположено вблизи очага повышенной температуры. В случае вершинного пожара огнем охвачена область от  $h_1$  до  $h_2$ , где  $h_1$  — высота нижней границы полога,  $h_2$  — высота верхней границы полога леса.

Считалось, что органическая масса полога леса в соответствии с моделью, принятой в [1], представляет собой многофазную реакционно-способную пористую сплошную среду, состоящую из сухого органического вещества, воды в жидкокапельном состоянии, конденсированных продуктов пиролиза, обогащенных углеродом, минеральной части (золы), газовой и дисперсных фаз. Для простоты считаем, что CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> и другие горючие компоненты, входящие в состав летучих продуктов пиролиза, можно моделировать одним эффективным горючим газом с реакционными свойствами оксида углерода [1], а CO<sub>2</sub> и другие инертные компоненты — эффективным продуктом реакций, получая, таким образом, газовую фазу, состоящую из трех компонентов: окислителя (O<sub>2</sub>), горючего газа (в качестве эффективного горючего газа принимаем CO как преобладающий среди горючих компонентов продуктов пиролиза) и CO<sub>2</sub> совместно с другими инертными компонентами газовой фазы. Перенос энергии от фронта горения к негорящему топливу в общем случае

Работа доложена на Международной научной конференции «Сопряженные задачи механики и экологии», Томск, 4–9 июля 2000 г.

осуществляется путем кондукции, конвекции и излучения [1]. В случае вершинных верховых пожаров наиболее важным механизмом переноса энергии является конвекция [1]. В то же время вблизи фронта пожара излучение играет значительную роль, в том числе излучение факела пламени. Длина свободного пробега излучения в пологе леса определяется по формуле  $l_R = 1/\chi \approx s^{-1}$  [2, 3], где  $\chi$  — интегральный коэффициент поглощения,  $s$  — удельная поверхность фитомассы. Поскольку в пологе леса  $s \approx 1 \text{ м}^{-1}$  [4], то  $l_R \ll h$ , где  $h = h_2 - h_1$  — характерный размер (высота полога), следовательно, перенос излучением можно рассматривать в диффузионном приближении. Над пологом рассматривается факел пламени. Считается, что этот факел излучает как плоская стенка длиной  $l$ , расположенная под некоторым углом  $\gamma_2$  к поверхности полога, значение которого зависит от скорости ветра над пологом леса.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В области полога леса уравнения, выражающие законы сохранения многокомпонентной реагирующей среды в дивергентной форме [1] с учетом двухтемпературности среды и с использованием допущения Буссинеска, имеют вид:

$$\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_5 u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_5 v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_5 w)}{\partial z} = Q; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 uw) = \\ = \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_5 s c_d u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right); \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 vw) = \\ = - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho_5 s c_d v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 w^2) = \\ = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_5 s c_d w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \rho_5 g; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 c_{p5} T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 c_{p5} u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 c_{p5} v T) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 c_{p5} w T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_5 R_5 (1 - \nu_5) - \alpha_v (T - T_s) + c_{p5} T Q + \\ + k_{s,v} c_{p,s} (T_s - T) (1 - \alpha_c) R_{1s} + k_7 c_{p7} (T_s - T) R_2; \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \left( \rho_i \varphi_i c_{p,i} \frac{\partial T_s}{\partial t} \right) = q_3 R_{3s} - q_2 R_{2s} + \\ + k_s (c U_R - 4 \sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s) + q_5 R_5 \nu_5; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 C_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 C_\alpha u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 C_\alpha v) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 C_\alpha w) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \right) + R_{5\alpha}; \\ \alpha = \overline{1, 2}, \quad \sum_{\alpha=1}^4 C_\alpha = 1, \quad C_4 = C'_4 = \text{const}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - \\ - k_s (c U_R - 4 \sigma T_s^4) = 0; \quad (8) \end{aligned}$$

$$p_e = \rho_5 R T \sum_{\alpha=1}^4 \frac{C_\alpha}{M_\alpha}; \quad (9)$$

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

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_c}{M_1} R_{3w}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (10)$$

$$\varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i; \quad (11)$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_c}{M_1} R_{3w}; \quad (12)$$

$$R_{1s} = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad (13)$$

$$R_{2s} = k_2 \rho_2 \varphi_2 T^{-0,5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right);$$

$$R_{3w} = k_3 s_\sigma \rho_5 C_1 \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right); \quad (14)$$

$$R_5 = k_5 M_2 T^{-2,25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \times$$

$$\times \begin{cases} x_1^{0,25} x_2, & x_1 \geq 0,05, \\ x_1 x_2, & x_1 < 0,05, \end{cases} \quad x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=1}^4 \frac{C_k}{M_k} M_i}; \quad (15)$$

$$R_{51} = -R_{3w} - \frac{R_5 M_1}{2M_2}, \quad (16)$$

$$R_{52} = (1 - \alpha_c) \nu_r R_1 - R_5, \quad R_{54} = 0.$$

Здесь  $c_{p,i}$ ,  $\rho_i$ ,  $\varphi_i$  — удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли  $i$ -й фазы многофазной реагирующей среды ( $i = 1$  — сухое органическое вещество,  $i = 2$  — вода в жидкокапельном состоянии,  $i = 3$  — конденсированные продукты пиролиза сухого органического вещества,  $i = 4$  — минеральная часть (зола),  $i = 5$  — газовая фаза);  $T$  — температура газовой фазы;  $T_s$  — температура твердой фазы;  $C_\alpha$  — массовые концентрации компонентов газовой фазы ( $\alpha = 1$  — кислорода,  $\alpha = 2$  — горючих компонентов продуктов пиролиза,  $\alpha = 3$  — продуктов окисления горючих компонентов пиролиза,  $\alpha = 4$  — инертных компонентов газовой фазы, нереагирующих продуктов пиролиза и водяного пара);  $u$ ,

$v$ ,  $w$  — проекции скорости на оси  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно;  $p$ ,  $p_e$  — давление в потоке и в невозмущенной области соответственно;  $U_R$  — плотность потока излучения;  $k_\Sigma$  — коэффициент ослабления;  $k_s$  — спектральный коэффициент поглощения;  $c$  — скорость света;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $R_{1s}$  — массовая скорость реакции пиролиза сухого лесного горючего материала (ЛГМ);  $R_{2s}$  — массовая скорость испарения влаги, связанной с ЛГМ;  $R_{3w}$  — массовая скорость исчезновения  $O_2$  в результате гетерогенного горения коксика;  $R_{3s} = M_c/M_1 R_{3w}$  — массовая скорость убыли коксика (углерода) в результате его горения;  $R_{51}$  и  $R_{52}$  — массовые скорости исчезновения и образования компонентов газовой фазы (кислорода и оксида углерода);  $R_5$  — массовая скорость газофазной реакции окисления оксида углерода;  $q_1 = 0$ ,  $q_2 = 3 \cdot 10^6$  Дж/кг,  $q_3 = 1,2 \cdot 10^7$  Дж/кг,  $q_5 = 10^7$  Дж/кг — тепловые эффекты реакций и процессов пиролиза ЛГМ, испарения связанной с ЛГМ воды, горения кокса и окисления летучих горючих продуктов пиролиза;  $C'_4$  — неизменная концентрация инертных компонентов;  $Q$  — массовая скорость образования газовой фазы;  $\alpha_v$  — коэффициент объемного (межфазного) теплообмена;  $\nu_5 < 1$  — доля теплоты газофазной реакции окисления газообразных продуктов пиролиза, поглощенная конденсированной фазой [1];  $M_\alpha$ ,  $M_c$ ,  $M$  — молекулярные масса индивидуальных компонентов, углерода и смеси в целом;  $s = 0,5 \text{ м}^{-1}$  — удельная поверхность фитомассы полога;  $c_d = 0,03$  — коэффициент сопротивления;  $s_\sigma = 1000 \text{ м}^{-1}$  — эффективная удельная поверхность коксика;  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_5$  и  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_5$  — энергии активации и предэкспоненты химических реакций, численные значения которых определяются соотношениями  $E_1/R = 9400 \text{ К}$ ,  $k_1 = 3,63 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ,  $E_2/R = 60000 \text{ К}$ ,  $k_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ К}^{1/2}/\text{с}$ ,  $E_3/R = 10000 \text{ К}$ ,  $k_3 = 1000 \text{ с}^{-1}$ ,  $E_5/R = 11500 \text{ К}$ ,  $k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_c = 0,06$  — коксовое число ЛГМ;  $\nu_r = 0,7$  — массовая доля горючего газа в общей массе летучих продуктов пиролиза;  $\mu_t$ ,  $\lambda_t$ ,  $D_t$  — коэффициенты динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии соответственно; параметр  $k_{s,v} c_{p,s} (T_s - T)(1 - \alpha_c) R_1$  характеризует вдув газообразных продуктов пиролиза из конденсированной фазы в газовую [5], степень влияния которого определяется коэффициентом влияния

$k_{s,v} \leq 1$ ;  $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_3 = 200 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_4 = 200 \text{ кг/м}^3$  — истинные плотности сухого ЛГМ, воды, коксика, золы соответственно;  $c_{p,s} = \sum_{j=1}^n c_{p,j} C_j$  — средняя теплоемкость смеси газообразных продуктов пиролиза, где  $n$  — количество основных газообразных продуктов пиролиза,  $C_j$  — их доля в общем объеме газа, выделившегося в результате этой реакции;  $k_7 c_{p7} (T_s - T) R_2$  характеризует вдвиг паров воды [5], степень влияния которого на общий тепловой баланс газовой фазы определяется коэффициентом влияния  $k_7 \leq 1$ ; значения  $k_{5v}$ ,  $k_7$  и  $\nu_5$  определялись в результате математических экспериментов путем согласования расчетных и экспериментальных данных по температуре горения во фронте лесного пожара.

Систему уравнений (1)–(6) необходимо решать с учетом начальных и граничных условий:

$$T = T_\Gamma, \quad T_s = T_\Gamma, \quad C_\alpha = C_{\alpha,\Gamma}, \quad (17)$$

$$x, y, z \in G, \quad 0 \leq t \leq t_3;$$

$$T = T_e, \quad T_s = T_e, \quad C_\alpha = C_{\alpha,e}, \quad x, y, z \notin G, \quad t = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial U_R}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial U_R}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0;$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial U_R}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial U_R}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0;$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0; \quad (24)$$

$$-\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h_1} = \alpha_1 (T - T_e), \quad (25)$$

$$-\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h_2} = \alpha_2 (T - T_e);$$

$$-\rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=h_1} = \beta_1 (C_\alpha - C_{\alpha,e}), \quad (26)$$

$$-\rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=h_2} = \beta_2 (C_\alpha - C_{\alpha,e});$$

$$\mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h_1} = 0, \quad \mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h_2} = \tau_w, \quad \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h_1} = 0; \quad (27)$$

$$\mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h_2} = 0, \quad \mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=h_1} = 0, \quad \mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=h_2} = 0; \quad (28)$$

$$\frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial z} \Big|_{z=h_1} = 0, \quad \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial z} \Big|_{z=h_2} = Q_R; \quad (29)$$

$$Q_R = \begin{cases} 0,5\varepsilon\sigma T^4 \times \\ \times \left( 1 + \frac{l \cos \gamma_2 - (x-x_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + 2l(x-x_0) \cos \gamma_2 + l^2}} \right), & x \geq x_0, \\ 0, & x < x_0; \end{cases}$$

$$l = k\sqrt{m_3\omega}, \quad \gamma_2 = \frac{\pi}{2} - \gamma_1, \quad (30)$$

$$\text{tg } \gamma_1 = \left( \frac{4u_e}{g\Delta_\Gamma} \right)^{1/4}.$$

Здесь  $G$  — область, соответствующая первоначальному очагу горения;  $t_3$  — время, за которое происходит зажигание от очага пожара;  $\alpha_2 = 500 \text{ Вт/м}^2$  — коэффициент теплообмена с окружающей средой на верхней границе полого леса;  $\alpha_1 = 500 \text{ Вт/м}^2$  — коэффициент теплообмена с окружающей средой на нижней границе полого леса;  $\beta_1 = \alpha_1/c_{p5}$  — коэффициент массообмена с окружающей средой на

нижней границе полога леса;  $\beta_2 = \alpha_2/c_{p5}$  — коэффициент массообмена с окружающей средой на верхней границе полога леса;  $\tau_w$  — напряжение трения на верхней границе полога леса;  $Q_R$  — плотность лучистого теплового потока [6], поступающего в полог леса от факела пламени; нижний индекс «e» относится к параметрам невозмущенного потока;  $l$  — длина факела пламени;  $m_3$  — запас ЛГМ, кг/м<sup>2</sup>;  $\omega$  — скорость распространения пожара, м/с;  $k = 10$  — эмпирический множитель для живой хвои;  $\gamma_1$  — угол отклонения факела пламени от вертикали;  $\gamma_2$  — угол между факелом пламени и плоскостью верхней границы полога леса;  $u_e$  — невозмущенная скорость ветра над пологом леса;  $\Delta_r$  — ширина фронта верхового лесного пожара, которая определяется как расстояние между двумя изотермами, соответствующими одной и той же температуре  $T = 750$  К;  $\varepsilon = 0,6$  — интегральная степень черноты факела пламени;  $x_0$  — текущая координата основания факела пламени, определяемая в процессе математического моделирования как точка, где реализуется максимум температуры;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена типичного элемента ЛГМ с газовой фазой.

Считалось, что выполняются условия подобия между процессами турбулентного тепло- и массообмена [1]:

$$\rho_5 D_t = \mu_t, \quad \lambda_t = \mu_t c_{p5}, \quad \beta = \frac{\alpha}{\rho_5 c_{p5}}, \quad (31)$$

где  $\beta$  — коэффициент массообмена элементов ЛГМ с газовой фазой внутри полога леса [1], а

$c_{p5} = \sum_{\alpha=1}^4 c_{p,\alpha} C_\alpha$  — теплоемкость газовой фазы,  $c_{p,\alpha}$  — теплоемкости отдельных компонентов газовой фазы. Постановка задачи в целом осуществлена с использованием общей математической модели лесных пожаров [1, 5].

### 3. МЕТОД ОСРЕДНЕНИЯ И ЗАДАЧА О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЕРШИННОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ОДНОРОДНОМ ЛЕСНОМ МАССИВЕ

С учетом однородности лесного массива по направлению  $y$  задача упрощается, так как все параметры состояния зависят от  $x$ ,  $z$  и  $t$ . Поскольку характерный размер лесного массива в горизонтальном направлении превышает высоту полога леса, с целью укрупнения информа-

ции целесообразно использовать прием осреднения исходных функций по высоте полога леса [1, 7] по правилу

$$\int_{h_1}^{h_2} \varphi dz = \bar{\varphi} h, \quad h = h_2 - h_1, \quad (32)$$

где  $\varphi$  — любая из искомых функций,  $\bar{\varphi}$  — ее среднее по высоте полога значение, а в качестве условия замыкания системы следует принять условия

$$\overline{\varphi f} = \bar{\varphi} \bar{f}, \quad \overline{\exp \varphi} = \exp \bar{\varphi}, \quad \overline{\varphi^{\frac{1}{n}}} = \bar{\varphi}^{\frac{1}{n}}. \quad (33)$$

Так как процесс происходит в неограниченном объеме, т. е. в термодинамически открытой системе, можно считать, что давление в зоне пожара слабо отличается от давления в невозмущенных условиях и  $p \approx p_e$  [4]. Наличие сильного ветра позволяет считать, что  $u \gg w$  и  $w \approx 0$ , а параметры течения слабо зависят от процессов горения, что, в свою очередь, позволяет использовать приближение постоянной равновесной скорости ветра в пологе леса  $u_*$ , для вычисления которой можно использовать соотношение, приведенное в работе [1]:

$$u_* = u_e f(s, c_d, h_2) f_1(h_1, h_2), \quad (34)$$

$$f = [1 + (1,6 s c_d h_2)]^{-1},$$

$$f_1 = \frac{1}{(1 - \bar{h}_1)^{\frac{1}{2}} |\ln \bar{h}_0|} \times \\ \times \left[ 1 + (1 + \ln \bar{h}_0)^2 - \bar{h}_1 \left( \left( \ln \frac{h_1}{h_0} - 1 \right)^2 + 1 \right) \right]^{1/2},$$

$$\bar{h}_0 = \frac{h_0}{h_2}, \quad \bar{h}_1 = \frac{h_1}{h_2}, \quad (35)$$

где  $h_0$  — высота нижнего яруса леса.

Для простоты анализа было принято, что  $\mu_t = 0,6$  кг/(м·с).

Таким образом, система уравнений (1)–(16) с начальными и граничными условиями (17)–(30) была сведена к более простой одномерной системе уравнений, описывающих процесс распространения вершинного лесного пожара в однородном лесном массиве с учетом двухтемпературности среды и излучения от факела пламени.

#### 4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЕРШИННЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ВДОЛЬ ПРОСЕК

Пусть в бесконечном лесном массиве пролегла прямая ровная просека шириной  $2\Delta_1$ . Сильный ветер направлен вдоль этой просеки. Ось  $x$  связана с направлением ветра и совпадает с осевой линией просеки, ось  $y$  направлена перпендикулярно направлению ветра и просеки в горизонтальной плоскости, ось  $z$  — вертикальная ось. Считается, что имеется плоскость симметрии в центре просеки по оси  $x$ . Плоский очаг повышенной температуры, расположенный вблизи начала координат и перпендикулярно направлению ветра и просеки, инициирует лесной пожар, тип которого определяется как вершинный верховой.

В области полога леса уравнения, выражающие законы сохранения многокомпонентной реагирующей среды с использованием допущения Буссинеска и в двухтемпературной постановке, имеют вид (1)–(16).

В части области определения, соответствующей просеке, система уравнений с использованием допущения Буссинеска имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_5 u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_5 v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_5 w)}{\partial z} = 0; \quad (36)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 uw) =$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_5 s c_d u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right); \quad (37)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 vw) =$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho_5 s c_d v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad (38)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 w^2) =$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_5 s c_d w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \rho_5 g; \quad (39)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 c_{p5} T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 c_{p5} u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 c_{p5} v T) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 c_{p5} w T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_5 R_5; \quad (40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 C_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_5 C_\alpha u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_5 C_\alpha v) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 C_\alpha w) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \right) + R_{5\alpha};$$

$$\alpha = \overline{1, 2}, \quad \sum_{\alpha=1}^3 C_\alpha = 1, \quad C_4 = C'_4, \quad (41)$$

$$R_5 = k_5 M_2 T^{-2,25} \exp \left( -\frac{E_5}{RT} \right) \times$$

$$\times \begin{cases} x_1^{0,25} x_2, & x_1 \geq 0,05 \\ x_1 x_2, & x_1 < 0,05, \end{cases} \quad x_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^3 \frac{C_k}{M_k} M_j}; \quad (42)$$

$$p_e = \rho_5 RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{C_\alpha}{M_\alpha}; \quad (43)$$

$$R_{51} = -\frac{R_5 M_1}{2M_2}, \quad R_{52} = -R_5, \quad R_{53} = 0. \quad (44)$$

Начальные и граничные условия (17)–(30) дополняются соотношениями

$$T \Big|_{y=\Delta_1-0} = T \Big|_{y=\Delta_1+0}, \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\Delta_1-0} &= \lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\Delta_1+0}; \\ C_\alpha \Big|_{y=\Delta_1-0} &= C_\alpha \Big|_{y=\Delta_1+0}, \\ \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial y} \Big|_{y=\Delta_1-0} &= \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial y} \Big|_{y=\Delta_1+0}, \end{aligned} \quad (46)$$

где индекс  $\Delta_1 - 0$  соответствует области просеки, индекс  $\Delta_1 + 0$  — области полога леса, а уравнения (45), (46) выражают условия сопряжения на границе просека — лес.

Считалось, что тепло- и массообмен с приземным слоем атмосферы и нижним ярусом леса осуществляется по закону Ньютона и выполняются условия подобия между процессами турбулентного тепло- и массообмена (31).

### 5. МЕТОД ОСРЕДНЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для упрощения постановки задачи был использован прием осреднения искомых функций по высоте полога леса с использованием правила (32), (33).

В плоскости  $(x, y)$  лес и просека были разбиты на одинаковые по ширине полосы  $(\Delta y)_i = y_i - y_{i-1}$  и осреднение основной системы уравнений проводилось по каждой полосе от  $y_{i-1}$  до  $y_i$ :

$$\int_{y_{i-1}}^{y_i} \varphi dy = \varphi_i (\Delta y)_i, \quad (47)$$

где  $\varphi_i$  — среднее значение величины  $\varphi$  при  $y_{i-1} < y < y_i$ . Для замыкания системы было принято, что

$$(\varphi f)_i = \varphi_i f_i, \quad (\exp \varphi)_i = \exp \varphi_i, \quad (48)$$

$$(\varphi^{1/n})_i = (\varphi_i)^{1/n}.$$

Считалось также, что  $u \gg v$ ,  $u \gg w$  и уравнения сохранения количества движения для компонент  $v$ ,  $w$  скорости были исключены из рассмотрения. Было принято  $p \approx p_e$  [4], равновесная скорость ветра в пологе  $u_*$  считалось постоянной (для ее вычисления используются соотношения (34)–(36)), а составляющие  $v$ ,  $w$  скорости — равными нулю. В области над

уровнем шероховатости просеки среднее значение скорости  $\bar{u}$  рассчитывалось с использованием логарифмического профиля. Таким образом была получена упрощенная двумерная модель распространения верховых вершинных лесных пожаров вдоль просек, в которой учитываются двухтемпературность среды и излучение факела пламени.

При проведении математического моделирования использовались представленные в [1] данные по теплофизическим (плотности, теплоемкости, начальные объемные доли фаз) и термокинетическим (энергии активации реакций пиролиза и горения и постоянные, характеризующие скорость сушки ЛГМ) характеристикам.

### 6. МЕТОД РЕШЕНИЯ ОСРЕДНЕННОЙ СИСТЕМЫ

Система уравнений, описывающая процесс распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах, с соответствующими начальными и граничными условиями для численного интегрирования была редуцирована к дискретной форме с помощью модификации метода контрольного объема Патанкара [8]. В соответствии с этим методом дифференциальные уравнения, описывающие тепло- и массообмен и гидродинамику, подчиняются обобщенному закону сохранения [8]. Если обозначить любую искомую функцию через  $\Phi$ , то обобщенное дифференциальное уравнение в одномерном случае примет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + S, \quad (49)$$

где  $t$ ,  $x$  — временная и пространственная координаты,  $\rho$  — плотность,  $u$  — проекция вектора скорости на ось  $x$ ,  $\Gamma$  — коэффициент переноса,  $S$  — источниковый член. Конкретный вид  $\Gamma$  и  $S$  зависит от смысла переменной  $\Phi$ . В том случае, когда источниковый член  $S$  зависит от  $\Phi$ , автор [8] рекомендует выразить эту зависимость в линейной форме:

$$S = S_C + S_P \Phi, \quad (50)$$

причем величины  $S_C$  и  $S_P$  сами могут зависеть от искомой функции  $\Phi$ .

Начальные и граничные условия для уравнения (49) записываются следующим образом:

$$\Phi \Big|_{t=0} = \Phi(x), \quad \alpha_i \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \beta_i \Phi = \gamma_i, \quad i = 1, 2, \quad (51)$$

где  $i = 1$  соответствует условию на левой границе области,  $i = 2$  — условию на правой границе области.

Способ деления расчетной области на контрольные объемы и способ построения дискретного аналога для уравнения вида (50) с соответствующими краевыми условиями типа (51) подробно изложены в работе [8]. В результате дискретизации дифференциальных уравнений (50) была получена система линейных алгебраических уравнений, для решения которых был использован метод прогонки или согласно [8] метод TDMA (Tree Dimensional Matrix Algorithm).

Поскольку система уравнений, описывающих процесс распространения верхового вершинного лесного пожара, существенно нелинейна и сами коэффициенты дискретных аналогов уравнений системы нелинейным образом зависят от искомых функций, был использован итерационный процесс при ее численном решении. Этот процесс включает следующие этапы.

1. В качестве начальных приближений для искомых функций используются их значения с предыдущего слоя по времени.

2. Рассчитываются предварительные значения коэффициентов в дискретном аналоге на основе начального профиля.

3. Решается номинально линейная система алгебраических уравнений, дающих новые значения искомых функций.

4. Осуществляется возврат ко второму этапу, в качестве начального профиля используется вновь полученный, и процесс повторяется до тех пор, пока разница значений искомых функций на двух соседних итерациях не достигнет заданной точности.

Для численного решения задачи о распространении вершинных лесных пожаров вдоль просек была использована разностная схема, построенная на основе одномерной схемы по  $x$ .

В результате разбиения области определения на полосы вся расчетная область оказалась поделенной параллельными друг другу и оси  $x$  координатными прямыми  $y = y_i$ .

Обобщенное дифференциальное уравнение в направлении  $x$  для контрольного объема, окружающего узловую точку, для осредненной по высоте полога леса и отдельным полосам  $(\Delta y)_i$  системы запишется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + S + \frac{1}{\Delta y}\left(\left(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)\Big|_{y=P} - \left(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)\Big|_{y=S}\right), \quad (52)$$

где последнее слагаемое учитывает влияние полос  $(\Delta y)_i$  и  $(\Delta y)_{i-1}$  друг на друга;  $y = P$ ,  $y = S$  соответствуют двум соседним узловым точкам на оси  $y$ . Включая это слагаемое в состав источникового члена  $S$  и обозначая его как  $S^*$ , получаем обобщенное дифференциальное уравнение (52) в традиционном виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + S^*, \quad (53)$$

$$S^* = S + \frac{1}{\Delta y}\left(\left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)\Big|_{y=P} - \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)\Big|_{y=S}\right) = S_C^* + S_P^*\Phi_P.$$

При построении дискретного аналога используется тот же метод контрольного объема [8] для одномерного случая, а последнее слагаемое (53) дискретизируется с помощью метода конечных разностей (с учетом условия  $\Gamma = \text{const}$ ):

$$\frac{\partial\Phi}{\partial y}\Big|_{y=P} - \frac{\partial\Phi}{\partial y}\Big|_{y=S} = \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y} - \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y} = \frac{\Phi_N - 2\Phi_P + \Phi_S}{\Delta y}. \quad (54)$$

Система линейных алгебраических уравнений решалась также с использованием метода прогонки. Для решения всей системы уравнений, описывающей процесс распространения вершинных лесных пожаров вдоль просек, был использован итерационный процесс, состоящий из следующих этапов.

1. В качестве начальных итерационных приближений неизвестных функций берутся их значения с предыдущего слоя по времени.

2. На каждой полосе  $(\Delta y)_i$  последовательно решается вся система уравнений в направлении  $x$ : для каждого уравнения рассчитываются предварительные значения коэффициентов в дискретном аналоге на основе начального профиля и решается номинально линейная система алгебраических уравнений с помощью метода

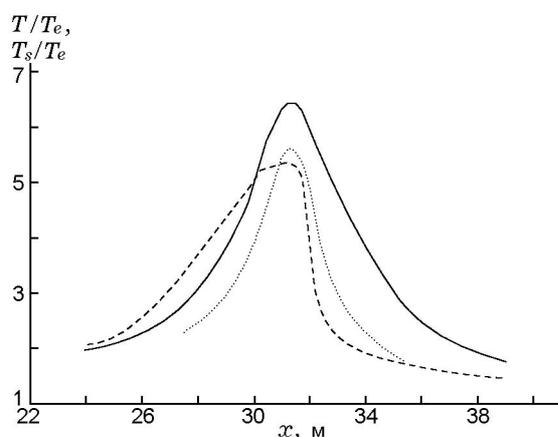


Рис. 1. Распределения температур:

сплошная кривая соответствует температуре газовой фазы, штриховая — температуре твердой фазы, пунктирная — аналогичному расчету в однотемпературной постановке;  $u_* = 3$  м/с,  $h_1 = 2$  м,  $h_2 = 12$  м,  $c_d = 0,02$ ,  $s = 0,5$  м<sup>-1</sup>,  $s_\sigma = 1000$  м<sup>-1</sup>,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 500$  Дж/(м<sup>2</sup>·с), относительное влагосодержание  $W = 66,1$  %,  $\nu_r = 0,7$ ,  $u_e = 8,7$  м/с

ТДМА [8]. Таким образом, после получения решения системы на одной полосе осуществляется переход к следующей полосе и покрывается вся расчетная область.

3. В качестве начального профиля  $\Phi$  используется вновь полученный, и процесс, описанный в п. 2, повторяется до тех пор, пока разница в значениях искомой функции на двух соседних итерациях не достигнет заданной точности (не более 1 %) на всей расчетной области.

### 7. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате численного интегрирования одномерной системы уравнений, описывающих процесс распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах, с соответствующими начальными и граничными условиями были получены поля температуры газовой и твердой фаз, массовых концентраций компонентов газовой фазы, объемных долей компонентов твердой фазы в различные моменты времени. На рис. 1 представлены распределения полей безразмерной температуры газовой фазы (сплошная линия) и твердой фазы (штриховая линия) в момент времени, соответствующий установившемуся режиму распространения фронта верхового лесного пожара со скоростью  $\omega = 2$  м/с. В этом вариан-

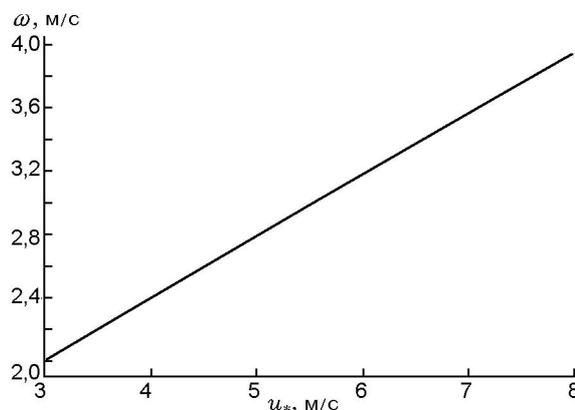


Рис. 2. Зависимость скорости распространения пожара от равновесной скорости ветра в пологе леса:

$h_1 = 2$  м,  $h_2 = 12$  м,  $c_d = 0,02$ ,  $s = 0,5$  м<sup>-1</sup>,  $s_\sigma = 1000$  м<sup>-1</sup>,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 500$  Дж/(м<sup>2</sup>·с),  $W = 66,1$  %,  $\nu_r = 0,7$ ,  $u_e = 8,7$  м/с

те значения теплофизических и термокинетических постоянных для ЛГМ соответствовали еловой хвое и тонким веточкам.

Из анализа полученных кривых следует, что максимальная разность температур газовой и конденсированной фаз  $(\Delta T)_{\max} = (T - T_s)_{\max}$  составляет 300 К. Более высокая температура в газовой фазе обусловлена тем, что именно в ней выделяется основное количество теплоты газофазной реакции окисления газообразных горючих продуктов пиролиза [1]. Пунктирная кривая на рис. 1 представляет профиль температуры в том же режиме при тех же условиях в однотемпературном приближении и без учета излучения факела пламени. Видно, что в этом случае максимальное значение температуры и ширина фронта пожара отличаются от результатов расчетов по двухтемпературной модели. Если в однотемпературной постановке ширина высокотемпературной зоны фронта составляет 5,5 м, то учет двухтемпературности дает значение 9,5 м.

Из рис. 1 следует, что в обеих моделях профили температуры представляют собой гауссовы кривые, вытянутые в направлении ветра. Ширина фронта пожара в двухтемпературной постановке значительно больше ширины фронта в однотемпературной модели, так как учет двухтемпературности среды позволяет выявить зону догорания конденсированных продуктов пиролиза.

На рис. 2 приведена зависимость скорости распространения пожара от равновесной ско-

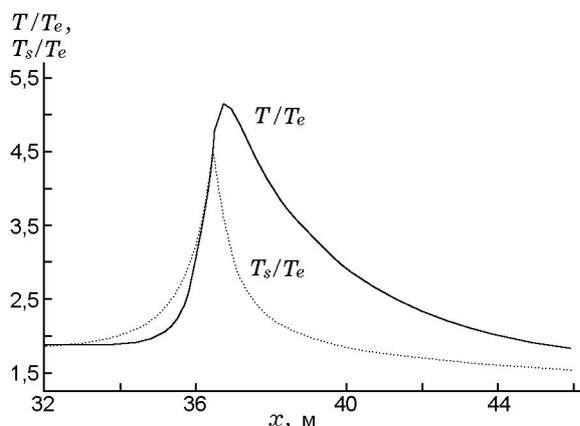


Рис. 3. Температурные кривые при  $v_s = 0,1$ ;  $k_{s,v} = k_7 = 0,0025$ :

$u_* = 3$  м/с,  $h_1 = 2$  м,  $h_2 = 12$  м,  $c_d = 0,02$ ,  $s = 0,5$  м<sup>-1</sup>,  $s_\sigma = 1000$  м<sup>-1</sup>,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 500$  Дж/(м<sup>2</sup>·с),  $W = 66,1$  %,  $\nu_r = 0,7$ ,  $u_e = 8,7$  м/с

рости ветра в пологом лесу, полученная на основе расчетов с различными значениями скорости ветра. Рассчитанная линейная зависимость согласуется с данными, приведенными в работах [1, 9, 10].

Описанные выше расчеты были проведены без учета слагаемых, описывающих вдув газообразных продуктов пиролиза и паров воды. Как видно из рис. 1, такой подход, принятый у многих авторов, дает завышенное значение температуры во фронте пожара.

Поскольку ранее оценка этих эффектов, впервые описанных в работе [1], не проводилась, значения коэффициентов  $k_7$  и  $k_{s,v}$  оставались неизвестными. Определить их можно было с помощью численного эксперимента. Для этого значения коэффициентов последовательно менялись, и расчет модели проводился до тех пор, пока не получали устойчивое распространение пожара с максимально возможным понижением температуры во фронте пожара до физически реальных величин. Расчеты показали, что оптимальными значениями указанных коэффициентов являются следующие:  $k_{s,v} = k_7 = 0,0025$ ,  $\nu_5 = 0,1$  (рис. 3). При таких значениях коэффициентов  $T_{\max} = 1500$  К,  $(T_s)_{\max} = 1300$  К,  $(\Delta T)_{\max} = (T - T_s)_{\max} = 200$  К,  $w = 2,4$  м/с.

Результаты расчетов профилей физических величин задачи о распространении вершинного пожара вдоль просеки были получены для различных полос, параллельных просеке, а также (в виде изотерм и линий равных кон-

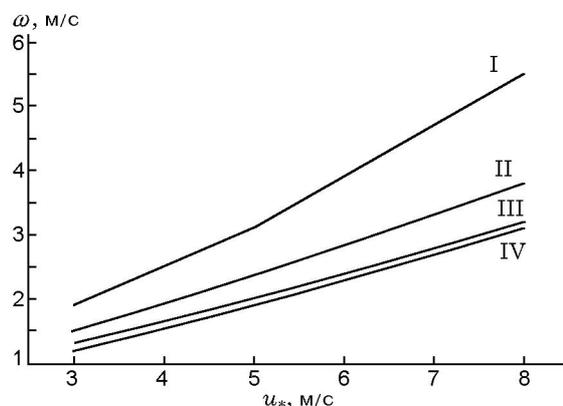


Рис. 4. Изменение скорости распространения пожара в каждой контрольной полосе с ростом скорости ветра в пологом лесу:

I — соответствует первой контрольной полосе; II, III, IV — второй, третьей и четвертой контрольным полосам, расположенным в области определения решения задачи;  $h_1 = 2$  м,  $h_2 = 12$  м,  $c_d = 0,02$ ,  $s = 0,5$  м<sup>-1</sup>,  $s_\sigma = 1000$  м<sup>-1</sup>,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 500$  Дж/(м<sup>2</sup>·с),  $W = 66,1$  %,  $\nu_r = 0,7$ ,  $u_e = 8,7$  м/с

центраций) для двух типов очагов, инициирующих лесной пожар. В первом случае очаг моделировался как область повышенной температуры бесконечной протяженности по оси  $y$ , работа которого ограничена конечным временем зажигания, достаточным для формирования самостоятельно развивающейся волны горения. Полученные в этом случае результаты расчетов при различных значениях скорости ветра выявили линейную зависимость скорости распространения пожара от равновесной скорости ветра на каждой полосе  $(\Delta y)_i$  (рис. 4). Здесь области I–IV соответствуют зависимостям скорости распространения пожара  $\omega$  от равновесной скорости ветра на полосах  $y$  I–IV, при этом I — полоса, прилегающая к просеке. Из рисунка видно, что скорость распространения пожара на полосе I больше, чем в глубине лесного массива при всех значениях равновесной скорости ветра. На рис. 5 приведены результаты расчетов при полуширине просеки  $\Delta_1 = 2$  м и скорости ветра  $u_e = 23$  м/с. Кривые I–IV соответствуют профилям температур на полосах I–IV. Кривая  $y < \Delta_1$  соответствует распределению температуры в центре просеки. Из рисунка видно, что при такой полуширине просеки над самой просекой наблюдается волна горения в газовой фазе, движущаяся с опережением относительно фронта, распространяющегося по лесному массиву. Это явление объясняется тем, что часть летучих горючих продуктов

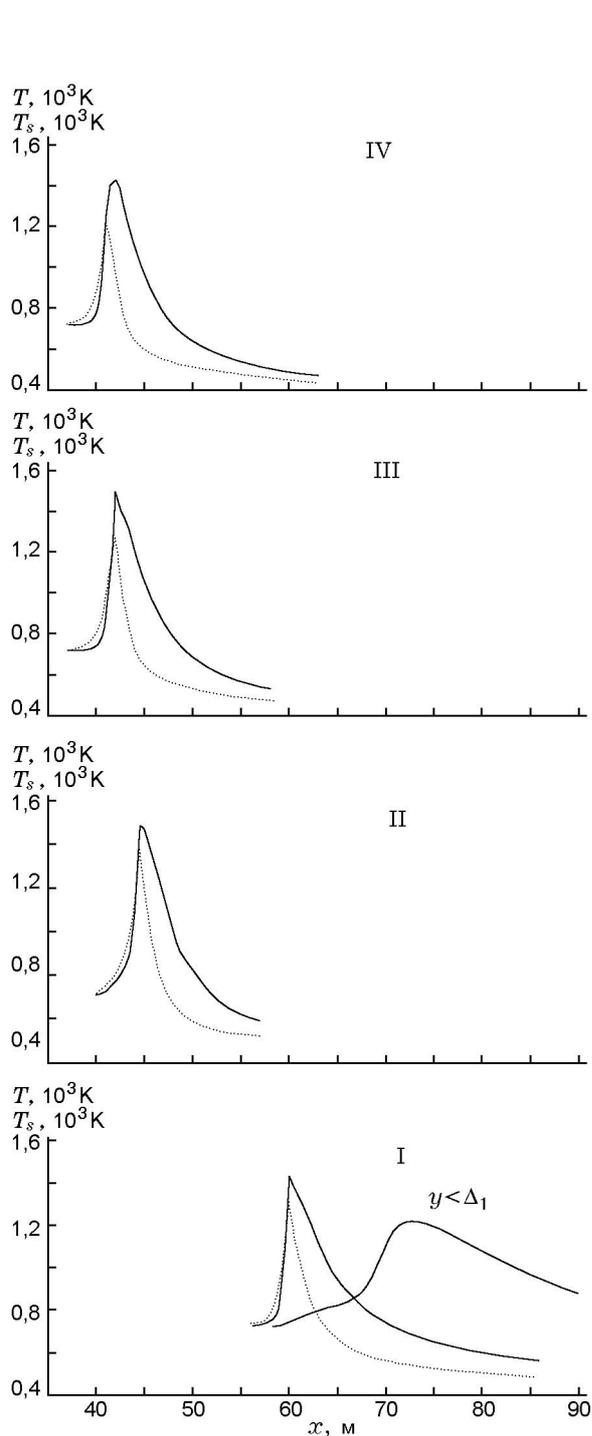


Рис. 5. Распространение фронта при полуширине просеки 2 м:

$u_* = 3 \text{ м/с}$ ,  $h_1 = 2 \text{ м}$ ,  $h_2 = 12 \text{ м}$ ,  $c_d = 0,02$ ,  $s = 0,5 \text{ м}^{-1}$ ,  $s_\sigma = 1000 \text{ м}^{-1}$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 500 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $W = 66,1 \%$ ,  $\nu_r = 0,7$ ,  $u_e = 23 \text{ м/с}$ ; сплошная кривая соответствует температуре газовой фазы, пунктирная — температуре твердой фазы

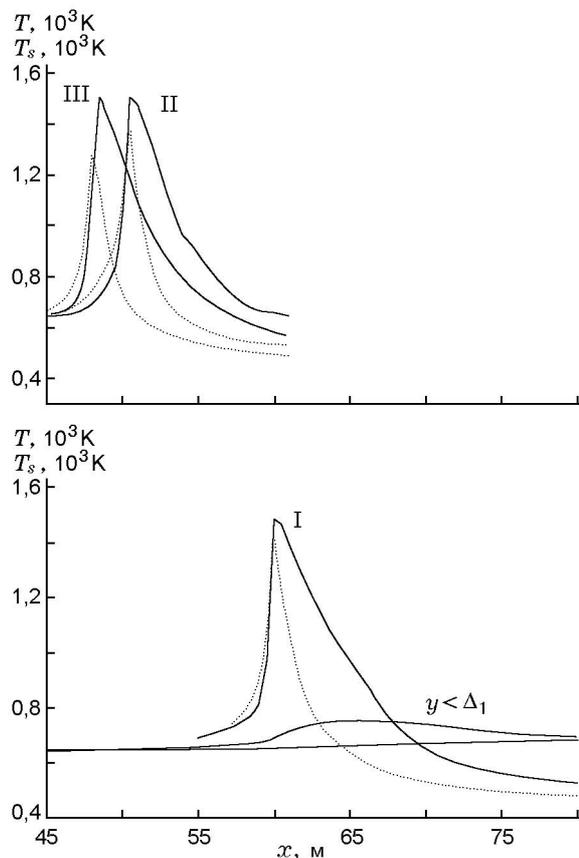


Рис. 6. Температурные кривые во фронте лесного пожара при полуширине просеки 4 м: сплошная кривая соответствует температуре газовой фазы, пунктирная — температуре твердой фазы

пиролиза попадает в область над просекой. Поскольку ширина просеки достаточно мала, накапливается достаточное количество горючего газа для поддержания самостоятельно движущейся волны горения, температура в которой достигает 1200 К. Так как осредненная скорость ветра над просекой превышает равновесную скорость ветра в пологе леса, волна горения над просекой движется с некоторым опережением относительно фронта пожара, распространяющегося по лесному массиву. С увеличением ширины просеки это явление исчезает. На рис. 6 представлены результаты расчетов при полуширине просеки  $\Delta_1 = 4 \text{ м}$  и прочих равных условиях. На этом рисунке кривые I–III соответствуют температурным профилям на полосах I–III, расположенных в лесном массиве. Кривые  $y < \Delta_1$  соответствуют распределению температуры на двух полосах, попадающих в область просеки. Видно, что в центре

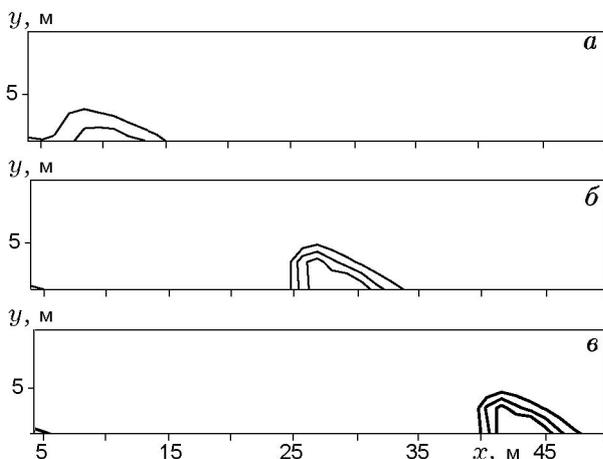


Рис. 7. Изотермы фронта вершинного лесного пожара, движущегося вдоль просеки, в последовательные моменты времени:

$a - t = 10$  с;  $б - t = 13,8$  с;  $в - t = 17,3$  с;  
 $u_* = 3$  м/с,  $h_1 = 2$  м,  $h_2 = 12$  м,  $c_d = 0,02$ ,  $s = 0,5$  м<sup>-1</sup>,  $s_\sigma = 1000$  м<sup>-1</sup>,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 500$  Дж/(м<sup>2</sup>·с),  
 $W = 66,1$  %,  $\nu_r = 0,7$ ,  $u_e = 8,7$  м/с

просеки температура практически постоянна, у кромки леса отмечается повышение температуры вблизи движущегося по лесному массиву фронта пожара.

Результаты решения задачи при моделировании очага инициирования пожара (время действия которого не ограничено) ограниченной в пространстве областью повышенной температуры, связанной с началом координат, приведены на рис. 7. Расчеты показали, что с течением времени близлежащая часть полога нагревается и происходит зажигание. Образовавшаяся высокотемпературная зона в течение некоторого времени удлиняется в поперечном направлении и смещается в направлении  $x$ . Форма этой зоны, описанная изотермами  $T = 750, 950, 1050$  К, приобретает вид вытянутого «полулистика» с заостренным в направлении ветра концом. Сформировавшийся таким образом контур продолжает продвигаться в направлении  $x$ , оставаясь практически неизменным. Подобный вид контура пожара, распространяющегося практически в одном направлении, имеет место при использовании эллиптической кинематической модели распространения верховых лесных пожаров [11] и наблюдался в реальных пожарах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе общей математической модели

лесных пожаров [1] даны новые математические постановки задач о распространении вершинных верховых пожаров.

С использованием метода контрольного объема Патанкара — Сполдинга разработана и проверена методика численного решения одномерной задачи, а затем с помощью того же метода разработана методика решения двумерной задачи.

В результате численного решения этих задач сделаны следующие выводы.

1. Учет влияния двухтемпературности среды приводит к увеличению толщины фронта пожара, но не меняет его структуру.

2. Для уточнения температуры горения во фронте верховых лесных пожаров необходимо учитывать влияние эффектов вдува газообразных продуктов пиролиза.

3. С увеличением скорости ветра скорость распространения пожара на лесных полосах шириной  $\Delta y$  растет по линейному закону, что согласуется с известными экспериментальными данными [9, 10].

4. Существует предельная ширина просеки  $2\Delta_*$  такая, что при выполнении условия  $2\Delta_1 < 2\Delta_*$  над самой просекой наблюдается волна горения газообразных продуктов пиролиза, опережающая основной фронт пожара в лесном массиве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Grishin A. M. Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting Them / Ed. by F. Albini. Tomsk: Publ. House of the Tomsk State Univ., 1997.
2. Раунер Ю. Л. Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
3. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
4. Дубов А. С., Быкова Л. П., Марунич С. В. Турбулентность в растительном покрове. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
5. Гришин А. М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложение для охраны и защиты леса // Сопряженные задачи механики и экологии (Избранные доклады международной конференции). Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 88–137.
6. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975.
7. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. Математическая теория верховых лесных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. С. 38–75.

8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоиздат, 1984.
9. Thomas P. H. Rates of spread of some wind-driven fires // J. Forestry. 1971. V. 44, N 2. P. 155–175.
10. Weber R. O. Modelling fire spread through fuel beds // Prog. Eveng. Combust. Sci. 1990. V. 17. P. 65–82.
11. Гришин А. М., Долгов А. А., Цимбалюк А. Ф. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. М.: Госкомитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997.

*Поступила в редакцию 9/XI 2000 г.,  
в окончательном варианте — 18/VI 2002 г.*

---